LES HYDROCARBURES D'ALSACE DANS LE CONTEXTE HISTORIQUE ET GÉODYNAMIQUE DU FOSSÉ RHÉNAN

THE CASE HISTORY OF OIL OCCURRENCE IN THE RHINE RIFT VALLEY OF ALSACE

Claude SITTLER

SITTLER, Cl. (1985). — Les hydrocarbures d'Alsace dans le contexte historique et géodynamique du fossé rhénan [The case history of oil occurrence in the Rhine rift valley of Alsace]. — *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, **9**, 2, 335-371, 18 fig., 3 tabl.; Pau, November 29, 1985. — ISSN : 0396-2687. CODEN : BCREDP.

The Alsatian Rhine graben is the most typical part of the western European rift system. Like other oil-producing rift valleys, it has been studied intensively. Downthrown in a N 20 direction since 45 MA, the rift is deeply cut into an old Palaeozoic shield which has preserved its Mesozoic cover, showing no relation to the graben. These more than 1 000 m Mesozoic, source rock bearing deposits, were uplifted during the whole of the Cretaceous period. More eroded in the north than in the south, they were folded by the earliest alpine compression.

The distensional rifting preserved this basement and so the Tertiary filling, up to 3 000 m, reflects this NE structural orientation : a series of uplift and trough zones, first subsiding in the south. A complex system of normal faults, mostly antithetic, Rhenish orientated, with flat dippings, divides eastward tilted fault blocks within the graben. In these longitudinal panels, oil is trapped in Mesozoic limestones, but essentially in Tertiary sandstones or alluvial fan sand lenses. The oil produced belongs to two distinct groups : one of paraffinic base originates from pre-rift beds, the other of mixed base belongs to the Tertiary. The tectonic pattern allows migration of Tertiary oils into Mesozoic reservoirs and vice versa. Thermal maturation leads to some dry gas fields in the Mio-Pliocene, otherwise oil was biodegraded by meteoric circulation.

Petroleum production in Alsace dates back to the 15th century and industrial extraction by means of mine shafts and galleries was practised from 1735 till 1963. More than 5 000 boreholes were drilled, but the fields are of very small importance. Data collected during the last 20 years about the rifting history in close relation to the oil occurrence are summarized.

Claude Sittler, CNRS, Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Institut de Géologie, Université Louis Pasteur, 1, rue Blessig, F-67084 Strasbourg CEDEX. — June 26, 1985.

Key words : Mesozoic, Tertiary, Taphrogeny, Petroleum, Structural traps, Rift zones, History, Exploitation, Oil migration, Oil and gas fields, Pechelbronn, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Rhine Graben, France, Germany.

0396-2687/85/0009-0335 $ 7.4

RÉSUMÉ

Le fossé rhénan effondré depuis 45 MA en direction N 20 s'est surimposé à un bouclier hercynien avec sa couverture mésozoïque plissée à la fin du Crétacé. L'évolution du rift par distension est classique; mais le remplissage sédimentaire reflète les anciennes orientations de direction varisque, les rythmes de l'effondrement par failles, le basculement du fossé et la remontée des bordures jusqu'au Quaternaire.

Les productions d'huile sont modestes et principalement liées au faciès détritique gréseux du Tertiaire (cônes alluviaux deltaïques) et aux calcaires du Jurassique moyen. Le flux géothermique élevé a conduit jusqu'à des gisements de gaz dans le Mio-Pliocène. La distinction entre des huiles pré-rift et des huiles syn-rift, leurs migrations dans deux sens et leur biodégradation fréquente sont justifiées par l'histoire sédimentaire et géodynamique.

La découverte et l'utilisation du pétrole en Alsace remontent au XV[e] siècle. L'exploitation industrielle par galeries de mines à Pechelbronn s'est poursuivie de 1735 à 1963, celle de l'asphalte de Lobsann entre 1838 et 1950. Une dizaine d'autres petits champs étaient en production ou le sont encore actuellement. Le bilan de la prospection pétrolière et de ses incidences scientifiques est présenté ici.

Mots-clefs : Secondaire, Tertiaire, Taphrogenèse, Pétrole, Piège structural, Rift, Migration, Historique, Exploitation, Champs hydrocarbures, Pechelbronn, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Fossé Rhénan, France, Allemagne.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENTS

INTRODUCTION

La découverte de pétrole en Alsace et son exploitation industrielle, qui remonte à deux siècles, ont irrigué de façon spectaculaire nos connaissances géologiques régionales grâce au creusement de mines et aux milliers de sondages effectués là. Par ailleurs, l'Alsace étant l'une des plus anciennes provinces pétrolières d'Europe (premier puits creusé en 1745, après plus d'un siècle et demi d'exploitation empirique), les recherches dans ce domaine y ont été d'une telle ampleur au cours des temps que nous leur devons toute une série d'études et de résultats techniques et scientifiques d'avant-garde : inventions de divers procédés de sondages mécaniques, mise au point de la prospection géophysique inventée par les frères Schlumberger, études chimiques sur la matière organique et formulation dès 1874 de la célèbre théorie du carbone asymétrique par le chimiste et industriel alsacien, directeur des mines d'asphalte de Pechelbronn, J.A. Le Bel.

Ce n'est, bien sûr, qu'après un grand nombre d'années de recherches pétrolières empiriques que l'on s'est intéressé à l'origine du pétrole et là encore les gisements d'Alsace, exploités par galeries de mines, ont fourni l'occasion unique de voir le pétrole en place dans les roches et à divers stades de sa formation ou de son évolution. Cela nous permet aujourd'hui d'aborder de façon logique l'histoire du pétrole alsacien : de sa naissance à sa disparition... par exploitation, mais aussi par biodégradation naturelle.

1. — GENÈSE ET EXODE DES HYDROCARBURES DU FOSSÉ RHÉNAN

Il est normal que dans ce creuset de l'industrie pétrolière de l'Europe se soient affrontées les premières idées scientifiques sur l'origine de « l'huile de pierre ». Après les hostilités de 1870 surtout, le gisement de pétrole de Pechelbronn est discuté dans une foule d'articles et de traités illustres, mais on confond souvent genèse et gisements. Les auteurs locaux participent activement à ces débats.

Le Bel (1885), considérant « la distribution des gisements sur le globe, le long de certains grands soulèvements forcément accompagnés de failles », attribue ceux d'Alsace « à la réaction de l'eau à haute température sur le carbure de fer... l'oxigène se fixant sur le fer et l'hydrogène sur le carbone ». Il écartait résolument la théorie de « la fermentation des matières végétales ou animales », ayant lui-même «cultivé la vase et le ferment putride dans des circonstances diverses avec le même résultat négatif ».

Daubrée (1893) met en évidence une anomalie de température exceptionnellement élevée dans le champ

de Pechelbronn; elle « paraît se rattacher à la même cause que la présence de pétrole, c'est-à-dire à l'influence particulièrement efficace, chimique ou autre, de l'activité interne du Globe ».

Van Werveke (1895) reconnaît le caractère saumâtre du milieu de formation, pyriteux, témoignant d'une grande richesse en matière organique; mais il voit cette genèse au sein des sables ou des argiles contiguës de la série tertiaire exclusivement, avec de faibles migrations occasionnelles.

De Chambrier (1919), directeur des mines de Pechelbronn, défend « l'idée que l'huile brute ne s'est pas formée dans ces dépôts de sable par la décomposition de matières animales ou végétales provenant du milieu ambiant, qu'il y a plutôt lieu de croire que le sable était déjà saturé d'huile lorsqu'il s'est déposé ». Il soutient ainsi « l'idée, abandonnée depuis longtemps, que l'huile ou la matière dont elle provient s'est formée de façon analogue à l'eau, c'est-à-dire dans l'atmosphère et non pas sous l'eau, ou dans les couches profondes de la croûte terrestre ».

Faut-il se souvenir que depuis deux ou trois décennies seulement l'origine exclusivement organique du pétrole est réellement admise et prouvée ?

1.1. GENÈSE DANS LES ROCHES MÈRES

En Alsace, des conditions un peu exceptionnelles de sédimentation et de diagenèse dans un domaine de rift doivent être envisagées (Ziegler, 1982; Perrodon, 1983). Les roches mères potentielles sont fort nombreuses, en particulier dans les « Zones bitumineuses » de la série tertiaire de remplissage du fossé rhénan (Fig. 1). Celles du Mésozoïque se limitent à quelques niveaux du Trias et au Lias.

Les conditions requises pour la maturation thermique du sapropel ont également existé puisque actuellement encore le flux de chaleur du graben est anormalement élevé (gradient de 5^0 à 12^0 pour 100 m; flux de 120-130 mW/m2). Cela pose même le problème de la stabilité des kérogènes : ses limites sont atteintes vers 1 200-1 500 m de profondeur, parfois même dès 600-700 m en Basse Alsace dans la région de Soultz-sous-Forêts. Selon les régions à subsidence plus ou moins active du rift, certains niveaux du Tertiaire, aujourd'hui presqu'à l'affleurement, ont été autrefois beaucoup plus profondément enfouis sous d'épais dépôts, érodés ensuite du fait de la mobilité tectonique du fossé rhénan (Tabl. I).

En retenant un âge de 30 MA pour les plus récentes des roches mères de l'Oligocène et en supposant que celles du Jurassique aussi n'aient rencontré des conditions de maturation favorables qu'à partir de la subsidence et du comblement tertiaire du fossé, le temps semble plus que suffisant pour la genèse des hydrocarbures.

1.2. EXODE VERS LES ROCHES RÉSERVOIRS

Dans une région aussi mobile que l'Alsace où les failles et fractures principales ne cessent d'être actives, les migrations d'huiles sont grandement facilitées. Leur cheminement vers la surface constitue des indices fort nombreux sous forme de suintements superficiels d'huile ou d'asphalte, surtout au nord de Haguenau et au sud d'Altkirch, en bordure du horst de Mulhouse. Par ailleurs, les nombreuses failles et fractures, si peu ouvertes qu'elles soient, livrent aussi passage aux eaux météoriques avec leurs bactéries qui contaminent alors l'huile, la dégradent et l'oxydent (Connan & Restlé, 1984).

En profondeur, des roches poreuses et perméables formant réservoir alternent assez heureusement avec des couches de marnes, d'argiles ou de sels, constituant de bonnes couvertures. Ceci est non seulement le cas pour la colonne stratigraphique tertiaire, où les roches réservoirs sont des lentilles de sable et des bancs de grès, malheureusement souvent discontinus (Fig. 2), mais aussi pour les terrains mésozoïques où les réservoirs se situent dans des calcaires oolithiques ou récifaux et des dolomies caverneuses fissurées du Jurassique et du Muschelkalk.

A cette complexité sédimentaire en Alsace s'ajoute la multiplicité des structures pièges allant du repli anticlinal à la faille cimentée, sans oublier les nombreuses lentilles sableuses emballées par des argiles. On comprend alors que dans ces petits réservoirs la pression soit insuffisante pour remonter l'huile et qu'il faille toujours des installations de pompage.

2. — L'HISTOIRE GÉOLOGIQUE : CLEF DE L'ALSACE PÉTROLIÈRE

Nous venons de voir que certaines caractéristiques sédimentaires, tectoniques et géothermiques du fossé alsacien ont influencé la genèse et la mise en place du pétrole. Tout est lié à la paléogéographie et à l'histoire de la région depuis les temps secondaires (Sittler, 1983).

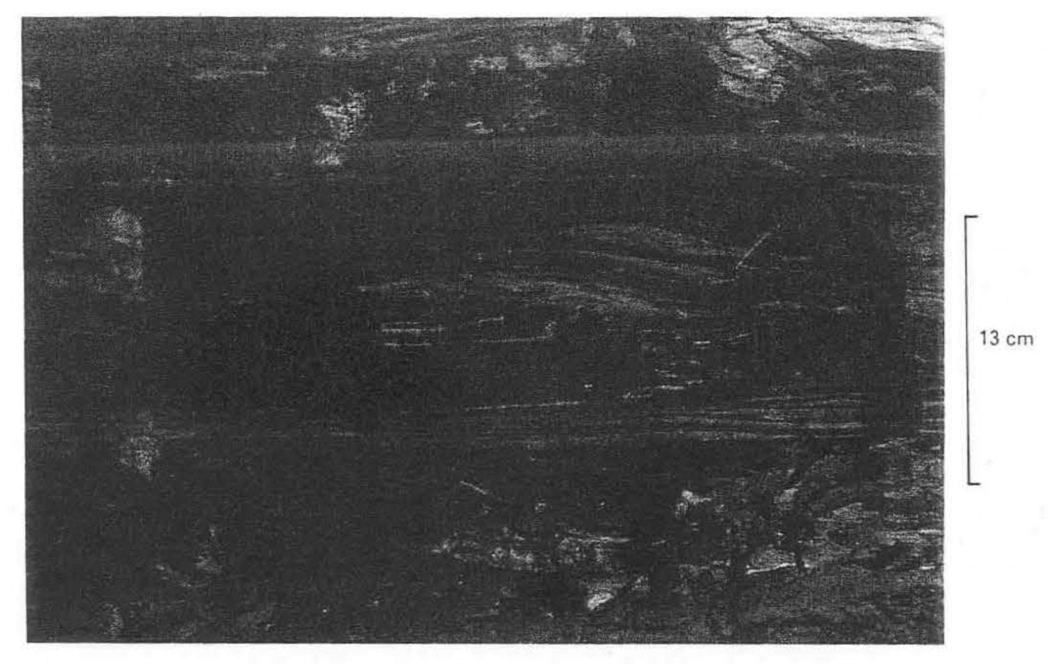


FIGURE 1

Roche mère de pétrole : argiles gris foncé bitumineuses, rubanées, intercalées entre des marnes plus claires. Oligocène : Couches de Pecheibronn supérieures — Galerie de mine, Siège Le Bel

Source rock : dark grey bituminous clays with varve-like stratification, within light-grey marls

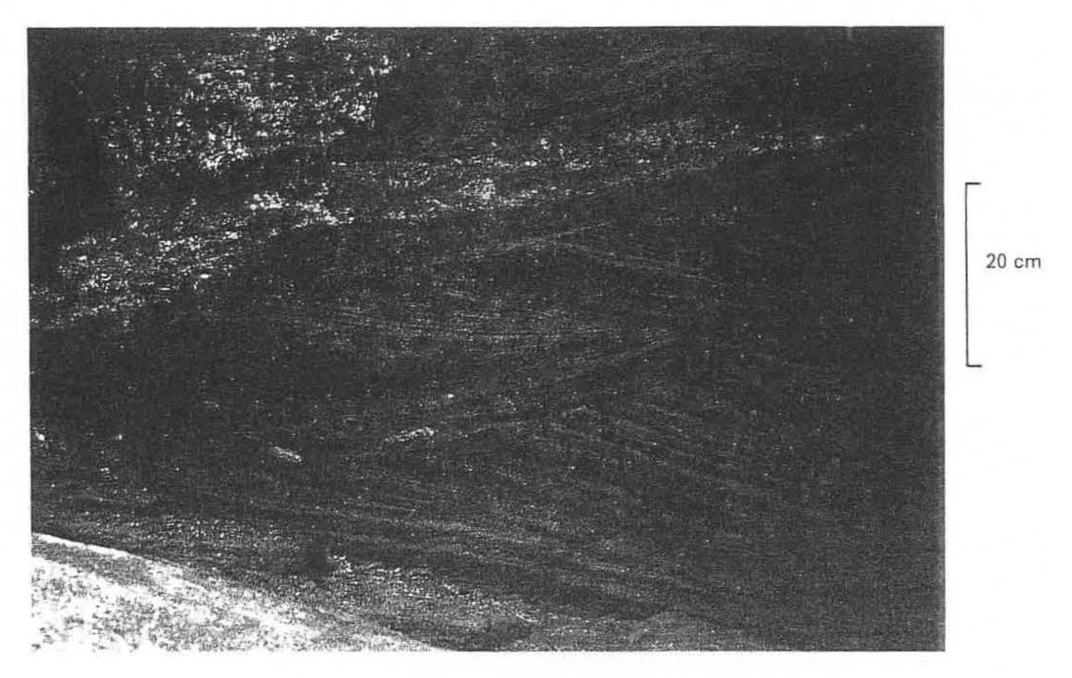


FIGURE 2

Roche réservoir de pétrole : biseau de lentille sableuse à structure sédimentaire entrecroisée. On note encore les taches d'huile résiduelle (ibid. Fig. 1)

Reservoir rock : bevel-edge of a sand lens showing nice cross-bedding and residual oil spots

2.1. TAPHROGENÈSE, PALÉOGÉOGRAPHIE ET SÉDIMENTATION PÉTROLIFÈRE

2.1.1. Événements paléozoïques et mésozoïques

L'ancien môle rhénan a été affecté par les plissements hercyniens, créant des rides synclinales et anticlinales orientées NE-SW, en partie pénéplanées par la suite. A l'ère secondaire, le vaste bassin germano-parisien accueille une sédimentation qui recouvre uniformément le domaine rhénan. Toutefois des zones d'instabilité persistent et reflètent la tectonique hercynienne : les dépôts sédimentaires du Permien et du Trias sont plus épais dans les dépressions synclinales que sur les anciennes rides anticlinales, donc sans aucun rapport avec le futur fossé rhénan (THÉOBALD, 1967).

Aux paysages fluviatiles du *Buntsandstein* (grès des Vosges) succèdent la mer du *Muschelkalk*, puis les lagunes du *Keuper*. Plusieurs horizons y ont des caractéristiques de roches mères potentielles marines ou lagunaires : Muschelkalk moyen marneux et salifère, Lettenkohle dolomitique avec marnes schisteuses noires et passées gréseuses. Mais on y trouve aussi des roches réservoirs : Muschelkalk supérieur secondairement dolomitisé, Grès à roseaux du Keuper moyen, grès du Rhétien.

Au *Lias*, la mer recouvre à nouveau toute la région; relativement peu profonde, elle s'approfondit vers le bassin souabe et ses dépôts, essentiellement marneux et argileux gris foncé, ont une bonne réputation de roches mères. Les fonds vaseux du Toarcien en particulier ont concentré le détritus organique pour former des argiles feuilletées noires, bitumineuses.

Au *Dogger*, les faciès sont toujours marins, mais plus variés avec des hauts-fonds et quelques tendances à l'émersion; là se trouve le réservoir gréseux de l'Aalénien, puis le calcaire oolithique du Bajocien, le plus riche et le plus répandu des horizons productifs du Secondaire.

Les faciès marneux plus profonds marquent le passage au *Jurassique supérieur* (Callovo-Oxfordien, noir, pyriteux), mais avec le faciès « Rauracien » apparaissent à nouveau les récifs qui sont démantelés dès le « Séquanien » riche en bioclastiques. Les calcaires récifaux peuvent constituer des réservoirs lorsqu'ils sont placés sous la couverture discordante du Tertiaire. En effet, ce sont là, sur la plate-forme méridionale, les derniers dépôts secondaires de la mer qui se retire vers le sud (Fig. 3).

Le bloc rhénan se soulève maintenant et cette phase tectonique de la fin du Jurassique conduit à l'émersion qui se poursuit tout au long du *Crétacé*. On ne connaît aucun dépôt sédimentaire de cette période où le massif Vosges - Forêt Noire affecte un bombement et où sa couverture secondaire de 1 500 m d'épaisseur subit une érosion, plus importante au nord en raison du relief plus élevé. Des émissions volcaniques datées, à partir de −100 MA, accompagnent l'altération climatique de type tropical à subtropical.

Ces phénomènes mis à part, nous manquons totalement d'informations précises entre −140 MA et 45 MA. Mais entre-temps un important plissement a modelé la couverture secondaire en une série de rides à grand rayon de courbure, orientées généralement ENE-WSW. Le style de ces déformations apparaît, selon les recherches actuelles, souvent plus cassant que souple et la régularité des rides s'estompe du sud au nord, preuve qu'il faut en rechercher le moteur au sud. On s'accorde pour attribuer ce plissement à la phase laramienne de la fin du Crétacé, vers −70 MA. Ces reliefs sont à nouveau soumis à l'érosion, ils constituent les bassins et seuils de la surface prétertiaire que les cartes gravimétriques mettent particulièrement bien en évidence (Fig 4).

2.1.2. Événements tertiaires

a) La phase continentale et volcanique pré-rift

La dénudation climatique et la formation de karsts fournit quelques dépôts résiduels difficiles à dater. Ils sont de trois types plus ou moins liés aux structures tectoniques du substratum jurassique : (a) les zones surélevées ou de seuils karstifiés sont tapissées de conglomérats et brèches calcaires, recimentés, parfois silicifiés, accompagnés d'argiles magnésiennes de néoformation; (b) les dépressions accueillent plutôt des argiles sableuses et ferrugineuses; (c) dans les karsts ou ailleurs, en placages, se trouvent des dépôts de remaniements très divers que l'on regroupe sous le nom de Sidérolithique : argile et sable blancs ou versicolores, pisolithes de fer limonitique, argiles kaoliniques. Des conditions climatiques d'altération latéritique existaient alors, mais le rapide démantèlement des profils et les épaisseurs des dépôts, variant entre 0 et 150 m, démontrent les effets d'une tectonique vivante au début de l'Éocène.

Il faut attendre l'*Éocène moyen* pour que se déposent de nouveaux sédiments : ce sont les calcaires et marnes lacustres à *Planorbis pseudoammonius*, auxquels sont associés des argiles noires, lignites et schistes bitumineux. Il ne s'agit pas d'une sédimentation régulière, mais de dépôts localisés dans de petites, mais parfois profondes

dépressions du bloc rhénan, plus particulièrement à l'aplomb des grandes rides synclinales hercyniennes. L'alignement de ces dépôts en direction N 20 traduit un rejeu de la zone de fragilité jalonnée déjà par les dépôts permiens volcano-sédimentaires. Et de fait, la première distension E-W du bloc rhénan se traduit par une *activité volcanique alcaline*, pour ne citer que celle d'Alsace dont les basaltes à néphéline sont datés −65, −61, −58 MA, puis les basaltes andésitiques datés −44 MA (BARANYI *et al.*, 1976). Cet épisode volcanique caractérise le stade pré-rift.

Les vieilles cicatrices du socle s'ouvrent et se manifestent à travers la couverture secondaire. L'instabilité de la croûte est évidente. Et quand une subsidence régulière apparaît dans la région méridionale, cet effondrement est guidé par des failles normales et des flexures qui délimitent le fossé et ses bordures. *On attribue ainsi l'ouverture du fossé, à son extrémité méridionale, à une phase pyrénéenne précoce de l'Éocène supérieur.*

b) La phase évaporitique à l'Éocène supérieur et à l'Oligocène inférieur

Du point de vue sédimentaire, les 2 000 à 3 000 m de remplissage du fossé sont issus de l'ablation de la couverture mésozoïque des Vosges et de la Forêt Noire. Ces dépôts recouvrent, en la conservant, la surface prétertiaire plissée et érodée. Les anticlinaux constituent des seuils et les synclinaux se transforment en bassins de subsidence différentielle jusqu'à l'Oligocène moyen (Fig. 5). Ce fait, ainsi que l'ouverture du graben d'abord au sud, entraînent des passages latéraux de faciès très variés (SITTLER, 1967).

Les premiers 500 à 1 000 m de dépôts sont d'âge éocène supérieur (Tabl. I). D'abord limniques puis saumâtres en alternance, ils révèlent de brèves ingressions marines à partir du domaine périalpin et une forte subsidence du fossé. Dans les lagunes du Haut-Rhin, des bancs de sel gemme massif se déposent, séparés par des marnes vertes ou gris foncé avec anhydrite et dolomie (*Zone salifère inférieure*). Dans le nord de l'Alsace, les influences marines et saumâtres s'estompent, des niveaux gréseux s'intercalent (*Zone dolomitique*). Rares sont les niveaux qui correspondent à une roche mère; mais des grès conglomératiques de la région de Pechelbronn forment un bon réservoir recouvert par l'horizon repère des marnes de la Couche rouge.

Avec les *Couches de Pechelbronn — Zones salifères moyennes et supérieures*, la transgression laguno-marine s'étend vers le nord, jusqu'au bassin de Mayence. Le maximum d'étendue et d'influence marine se situe dans la Zone fossilifère = Couches de Pechelbronn moyennes, mises en corrélation avec le début de l'Oligocène.

La succession des dépôts indique bien l'ouverture du fossé et sa subsidence progressive du sud au nord. Dans ce même sens apparaît aussi un passage des structures tectoniques synsédimentaires souples (flexures et failles) vers un système plus cassant.

Le long des bordures du fossé, la remontée isostatique des marges, auxquelles sont liés les champs de fractures, provoque une accumulation de dépôts grossiers : les conglomérats côtiers. Leur étude fournit de précieux renseignements sur la nature et l'ampleur des phénomènes tectoniques présidant aux décapages de l'arrière-pays; et ceci d'autant mieux que s'y interstratifient des repères de la sédimentation du large du fossé.

Au centre du graben, parmi les dépôts essentiellement marneux et salifères (Tabl. I), il faut remarquer la fréquence des imprégnations bitumineuses dans des marnes gris foncé, rayées, argilo-pélitiques, finement schisteuses. Elles renferment 2 à 3 % de bitumes, de la pyrite, du sel gemme et de l'anhydrite. Ces black-shales du fossé rhénan sont appelés *Zones bitumineuses* : ce sont ici des dépôts de transition, où les oscillations de faciès et d'apports sédimentaires favorisent et détruisent, tour à tour, la vie organique. Roches mères évidentes, la puissance cumulée de ces niveaux dépasse 100 m, mais ils se répartissent tout au long de la série éo-oligocène inférieur, correspondant à l'épisode évaporitique du rift allant jusqu'au dépôt de sels de potassium dans le bassin de Mulhouse.

Dans la moitié septentrionale du fossé, à l'exemple de ce qui se passe à Pechelbronn, ces couches renferment encore des chenaux lenticulaires sableux. Leur mise en place au hasard des courants fluviatiles, sous-aquatiques ou sous-marins, répond à une sédimentation de type deltaïque. Ces sables et grès des Couches de Pechelbronn sont les meilleures roches réservoirs du fossé rhénan.

Peu à peu, le golfe oligocène n'est plus alimenté en saumures. Qu'il s'agisse d'une régression marine ou d'une coupure de l'avant-pays alpin, le rythme de la subsidence ne ralentit guère. Les failles restent actives en bordure, alors que les dépôts sont caractérisés par une dessalure irrégulière, mais de plus en plus prononcée, aussi bien au nord qu'au sud. C'est une fin de cycle sédimentaire typique.

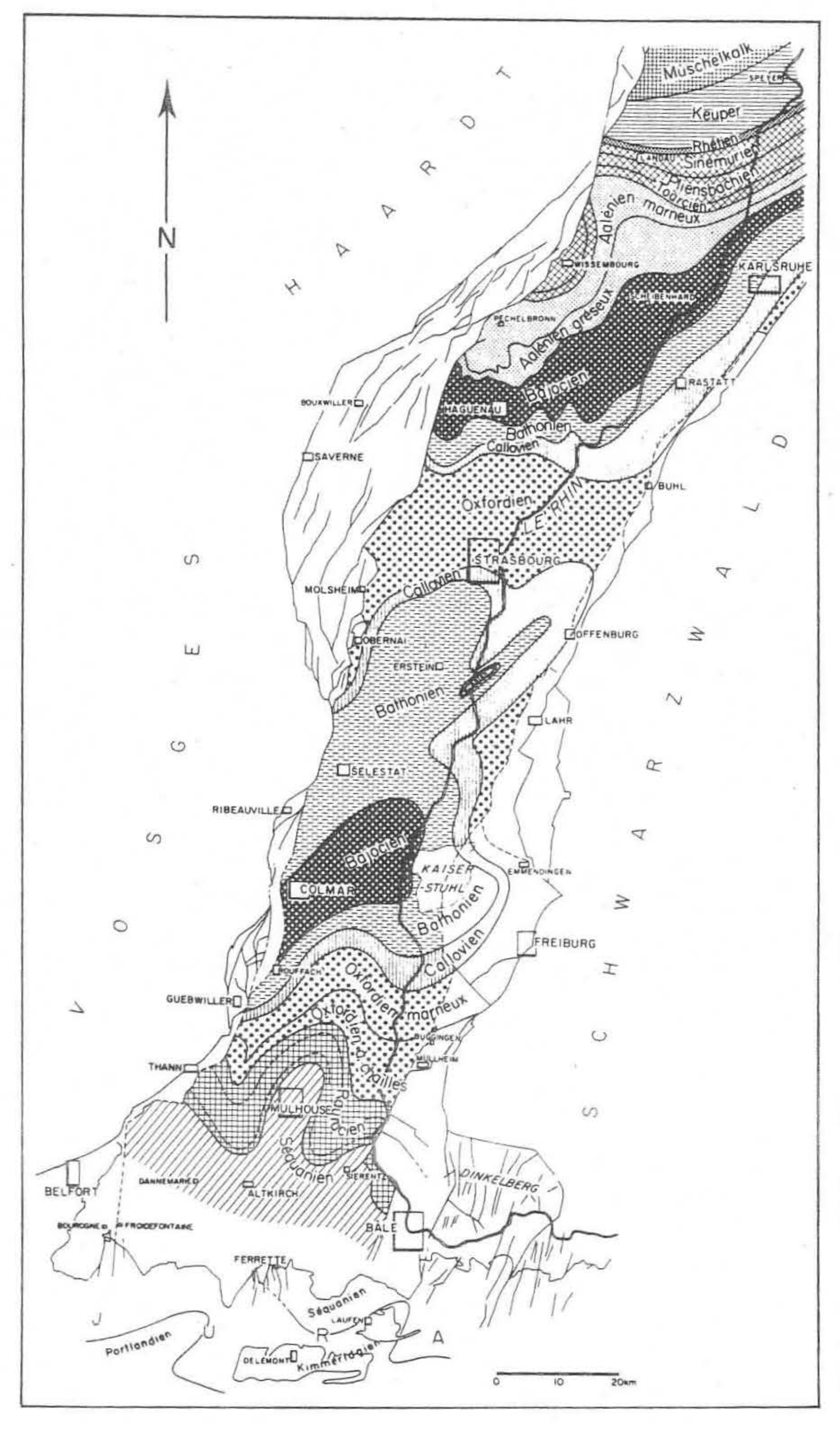


FIGURE 3

Reconstitution de la surface prétertiaire conservée au fond du graben, après avoir été plissée et vivement érodée surtout au nord (SITTLER, 1974). — Voir la coupe N-S complète de cette surface prétertiaire Fig. 5 B et la situation générale Fig. 6

The folded Mesozoic basement within the graben. Note the fold axes moulded on the variscan structure, and the larger Cretaceous ablation in the northern part of the shield. — See also longitudinal section of the whole Rhine graben on Fig. 5 B, and general situation on Fig. 6

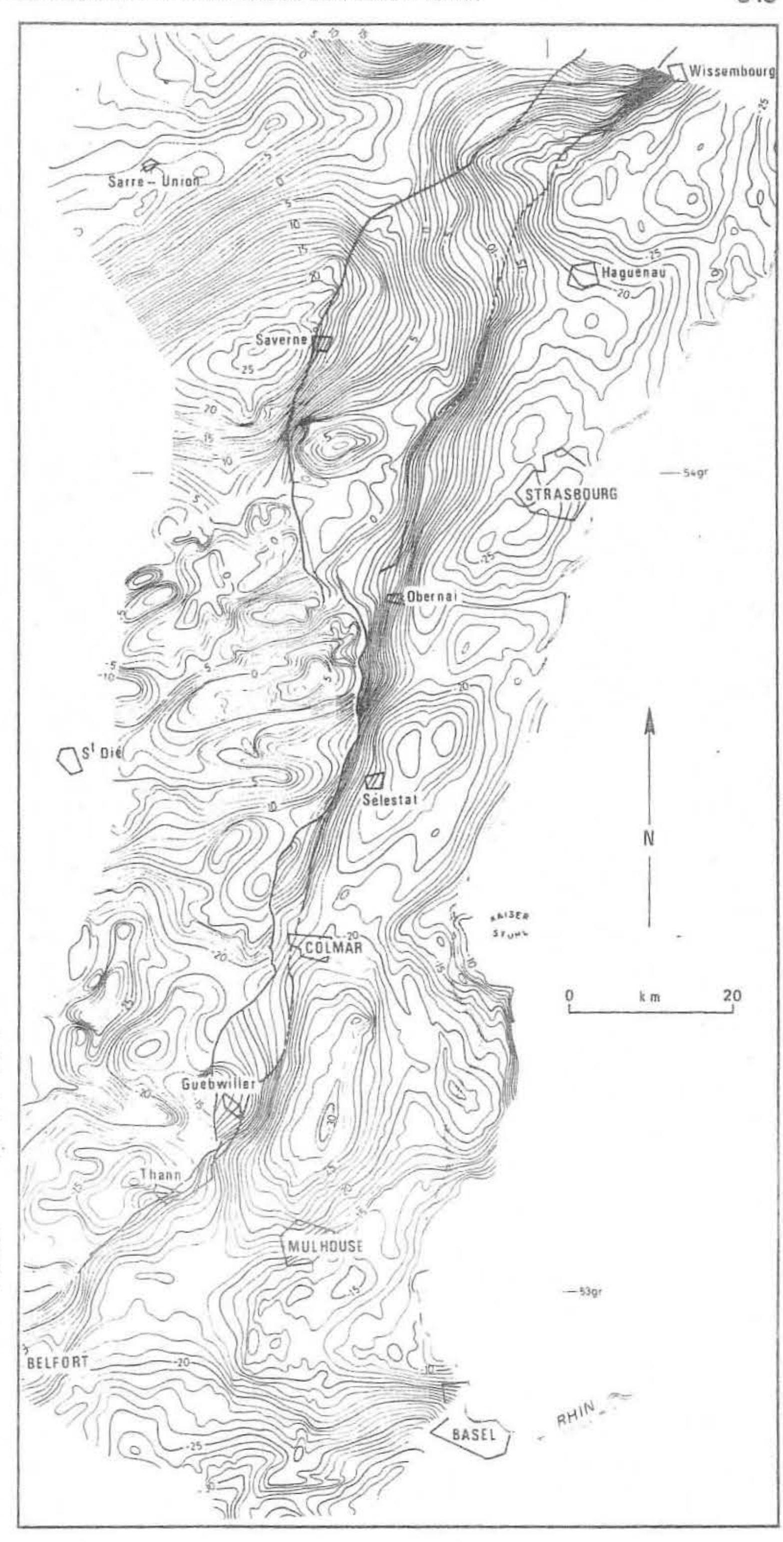


FIGURE 4

Anomalies gravimétriques de l'Alsace (Bouguer : densité de réduction 2,3 pour la plaine — 2,7 pour les Vosges). Les anomalies négatives dans le fossé marquent particulièrement les bassins sédimentaires tertiaires (d'après la carte gravimétrique de la France, BRGM et les levers des MDPA)

Gravimetric map (Bouguer anomaly) of the northeastern part of France. Note the basin and sill areas within the sedimentary filling of the trough (see Fig. 5).

From north to south :

- *Pechelbronn basin,*
- *S-Haguenau sill,*
- *Strasbourg basin,*
- *Erstein sill,*
- *Sélestat basin,*
- *N-Colmar sill,*
- *N-Mulhouse basin,*
- *S-Mulhouse Sundgau horst.*

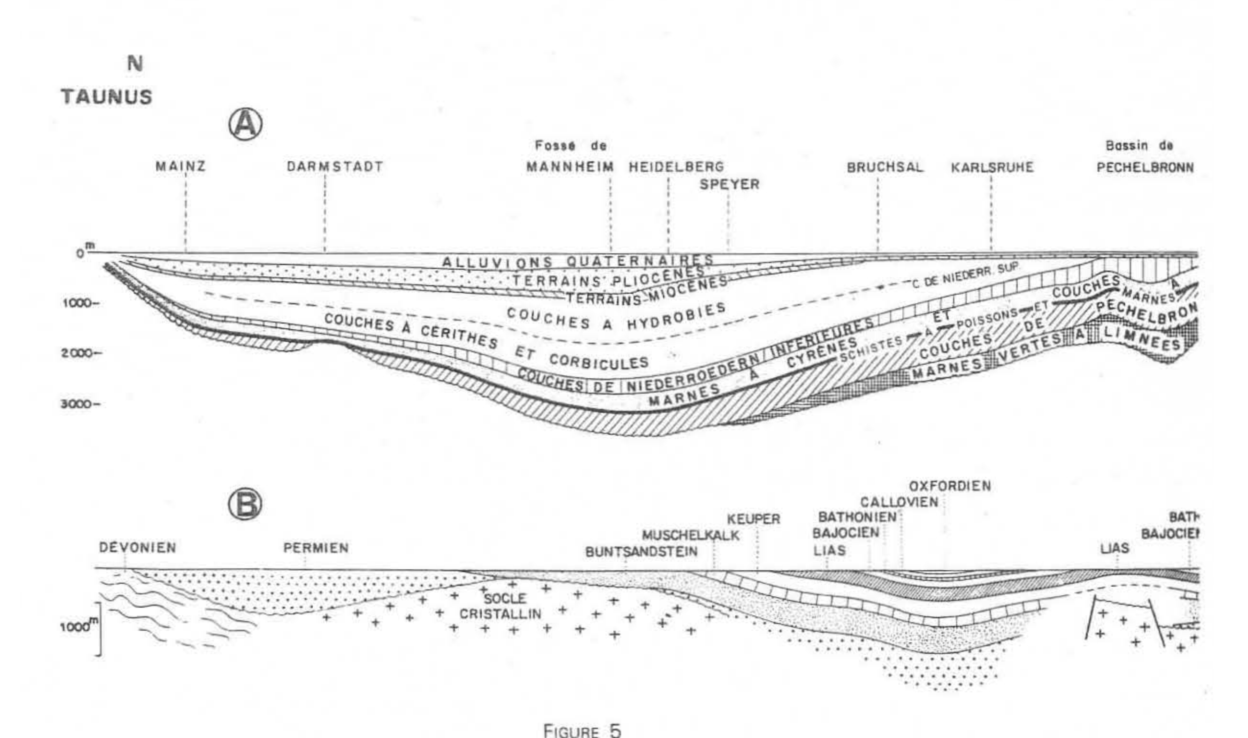


FIGURE 5

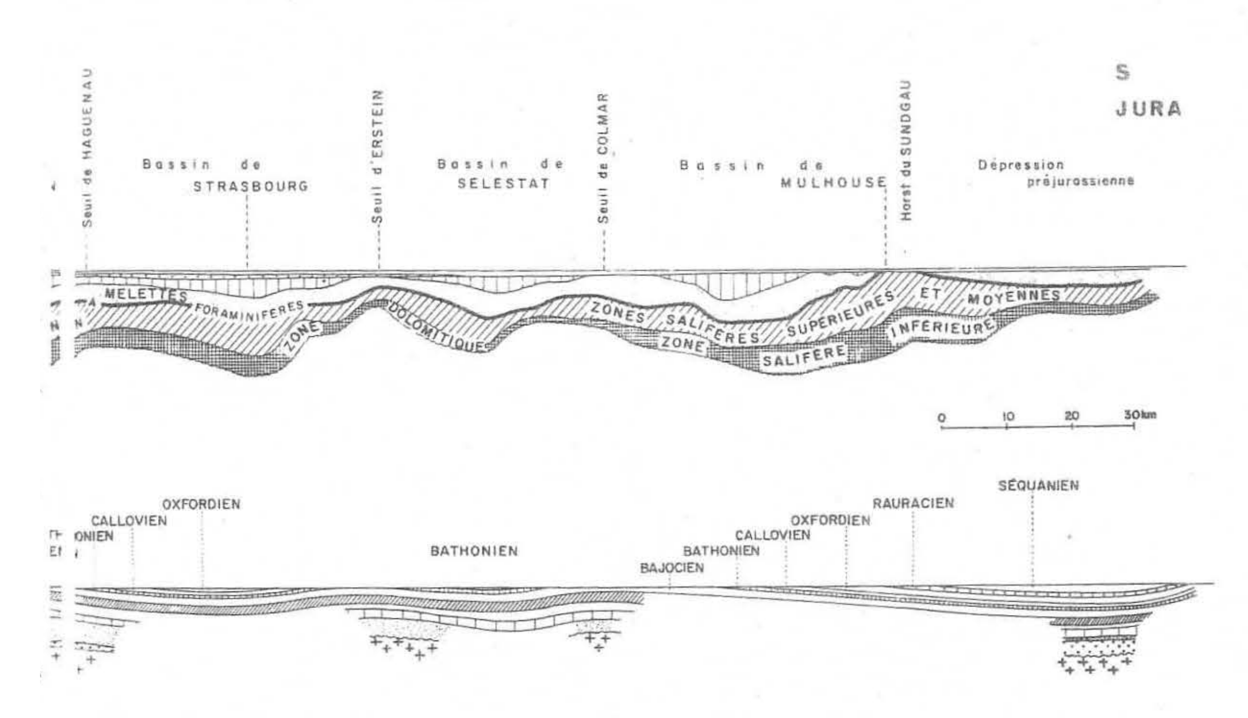
Coupe géologique N-S selon l'axe du fossé (SITTLER, 1983, modifié)
d'après les données de sondages et de la géophysique
A — Remplissage tertiaire en relation avec la subsidence différentielle
B — Substratum mésozoïque plissé ou surface d'érosion prétertiaire (dessin ramené à l'horizontale)

c) La phase d'océanisation à l'Oligocène moyen

L'invasion marine du *Rupélien* qui envahit le fossé rhénan à partir de la Mer du Nord est certes liée à la taphrogenèse, mais sans que celle-ci soit plus active à l'extrémité septentrionale du rift. En effet, la nouvelle sédimentation apparaît pratiquement continue avec quelques « récurrences » de faciès, indiquant un léger basculement du fossé dans lequel s'avancent les lèches marines avant de l'envahir très uniformément. Les dépôts de ce nouveau cycle dépassent aussi les lignes de rivage de l'Oligocène inférieur. De nouveaux conglomérats côtiers, avec faunes marines, soulignent une nouvelle phase d'effondrement; la subsidence est cette fois-ci presqu'aussi importante au nord qu'au sud de l'Alsace. Le taux de sédimentation se situe dans la fourchette des 100 m/MA; il est donc identique au taux relevé pour la partie moyenne du fossé à l'Oligocène inférieur (voir plus loin, 2.2.1.).

La *Série grise* comprend un premier cycle sédimentaire (carbonates, dolomies, sulfures) allant des Marnes à Foraminifères aux Schistes à Poissons (Tabl. I). Ces schistes noirs, bitumineux et pyriteux, sont issus d'un milieu sapropélien réducteur, riche en H_2S; ils forment un horizon régulier (20-30 m) de roches mères potentielles (DOEBL *et al.*, 1976). Le second cycle marin comprend les Couches à Mélettes et les Marnes à Cyrènes, où l'on voit la mer s'étendre, s'approfondir, puis se dessaler et se retirer vers le nord. Des faciès gréseux à la base et en intercalations lenticulaires forment des réservoirs intéressants, productifs dans le fossé moyen et septentrional.

Le retour aux dépôts d'eau douce s'effectue à l'Oligocène supérieur quand le fossé commence à se relever au sud; la mer ouverte se trouve alors



Longitudinal section of the Rhine graben and of its basement (bore-hole and geophysical data)
A — Tertiary filling following sill and trough zones
B — Mesozoic bottom or eroded pre-Tertiary surface (drawn in a horizontal level)

dans la région de Kassel (*Chattien*). En Alsace, les sédiments fluvio-lacustres carbonatés : *Molasse alsacienne* au sud, *Couches bariolées de Niederroedern* au nord, constituent parfois de petits réservoirs productifs. Ils le sont davantage dans les bassins allemands au nord, où les sables et calcaires alternent avec des marnes bitumineuses et des évaporites, considérées elles comme des roches mères.

d) La continentalisation progressive

Au *Miocène* a lieu un important basculement qui abaisse profondément le fossé septentrional. Ceci est dû à une nouvelle distension W-E accompagnée de décrochements senestres et d'une intense fracturation des dépôts tertiaires à l'intérieur du fossé (Fig. 5).

La sédimentation se déplace vers le nord où l'ombilic de subsidence dépasse 1 000 m (Mannheim-Heidelberg). La mer résiduelle, une « mer morte », s'y rassemble. La sédimentation surtout carbonatée (« Couches à Hydrobies supérieures ») y connaît des épisodes de salure et de dessalure qui se manifestent aussi dans le nord de l'Alsace à l'*Aquitanien* (Doebl & Geissert, 1971). D'excellents réservoirs d'huile et de gaz se situent dans ces couches en Allemagne.

Les volcanismes du Kaiserstuhl et du Vogelsberg résultent aussi de la nouvelle fracturation de la Croûte livrant passage aux laves basiques issues du Manteau supérieur et datées entre −18 et −16 MA (Burdigalien).

Depuis le Miocène moyen au moins, l'ensemble du fossé connaît l'émersion et une nouvelle longue période d'altération avec de rares dépôts détritiques fluviatiles (sables à *Deinotherium* du « Pontien »). Dans le fossé septentrional subsident, des formations lacustres assez importantes

TABLEAU I

Série stratigraphique du remplissage tertiaire et quaternaire du fossé rhénan alsacien, et ses variations latérales

Tertiary and Quaternary filling beds and lateral facies variations in Alsace

CONTINENTAL / SAUMÂTRE / MARIN	ÂGE en millions d'années	Étage		BASSIN DE PECHELBRONN (série type)	BASSIN POTASSIQUE (série salifère profonde)	HORST DE MULHOUSE - SUNDGAU (série calcaire et côtière)
		QUATERNAIRE		Alluvions rhénanes et vosgiennes (0 - 250 m), loess et lehms (0 - 30 m)		
	1,8 - 2,2	PLIO-QUATERNAIRE				
		TERTIAIRE – PLIOCÈNE		Argiles, sables et graviers 0 - 100 m		Cailloutis du Sundgau 0 - 20 m
	5,2	MIOCÈNE	MIOCÈNE supérieur			Pontien : Sables vosgiens à *Dinotherium*
		MIOCÈNE	AQUITANIEN	"Hydrobies" / Couches à "Corbicules" / "Cérithes" $\geqslant$ 380 m — 980 m		
	23	OLIGOCÈNE – CHATTIEN	SÉRIE BARIOLÉE	$\leqslant$ 600 m Couches de Niederroedern	Couches d'eau douce – carbonatées 250 m; – détritiques 330 m	Marnes lacustres et calcaires 200 m; Molasse alsacienne 90 m
	27	OLIGOCÈNE – RUPÉLIEN	SÉRIE GRISE	100 m Marnes à Cyrènes	100 m	10 - 30 m
		OLIGOCÈNE – RUPÉLIEN	SÉRIE GRISE	350 m Couches à Mélettes	300 m	*Sables marins de Wolfersdorf* 150 - 300 m
		OLIGOCÈNE – RUPÉLIEN	SÉRIE GRISE	5 - 35 m Schistes à Poissons	2 - 17 m	2 - 10 m
		OLIGOCÈNE – RUPÉLIEN	SÉRIE GRISE	10 - 30 m Marnes à Foraminifères	5 - 12 m	*Sables marins de Wolschwiller* 7 - 15 m
	31	OLIGOCÈNE – LATDORFIEN	COUCHES DE PECHELBRONN SUPÉRIEURES	90 m Zone à gypse et à passées limniques	50 m (ZONE SALIFÈRE SUPÉRIEURE)	Haustein sup. { marnes bariolées, marnes sableuses 40 m
		OLIGOCÈNE – LATDORFIEN	COUCHES DE PECHELBRONN SUPÉRIEURES	80 m Zone à sel et nodules d'anhydrite	400 m	Haustein inf. { calcaires, grès calcaires, conglomérats 50 m
		OLIGOCÈNE – LATDORFIEN	COUCHES DE PECHELBRONN SUPÉRIEURES	60 m Zone bitumineuse supérieure : marnes rayées à sable pétrolifère	100 m Zone bitumineuse supérieure : marnes rayées à sel gemme et potasse	
		OLIGOCÈNE – LATDORFIEN	COUCHES DE PECHELBRONN MOY.	80 m Zone fossilifère : marnes à Hydrobies, Bryozoaires, *Mytilus*	80 m (ZONE SALIFÈRE MOYENNE)	Calcaires en plaquettes et marnes rayées fossilifères 4 - 40 m
Oligocène / Eocène	?— 33	LATDORFIEN	COUCHES DE PECHELBRONN INF.	150 m Zone bitumineuse inférieure : marnes rayées bariolées et détritiques	200 m Zone bitumineuse inférieure : marnes rayées grises avec sel	Marnes vertes à gypse 80 m
	34 - 37	ÉOCÈNE supérieur		Couche rouge : marnes à anhydrite 0-200 m	Zone conglomératique ou marnes salifères 150 m (ZONE SALIFÈRE INFÉRIEURE)	
		ÉOCÈNE supérieur	ZONE DOLOMITIQUE	250 m Marnes dolomitiques vertes à Limnées / Marnes calcaires grises à anhydrite et sel	700 m	Complexe des marnes vertes et calcaires à Mélanies 350 m
	39 - 41	LUTÉTIEN		Argile basale ou calcaires et marnes lacustres ou dépôts sidérolithiques 0 - 100 m		
	45-65					
	150	SECONDAIRE :		LIAS – JURASSIQUE MOYEN ET SUPÉRIEUR		

(Jungtertiär I) et des marnes sableuses forment des réservoirs de gaz.

Puis, une nouvelle phase de mouvements verticaux inaugure le *Pliocène*. Les épaulements du graben, Vosges et Forêt Noire se soulèvent de façon significative et entraînent en partie les zones d'avant-monts qui subissent l'érosion de leurs terrains récents; les blocs tectoniques déplacés y sont plus étendus qu'à l'Éocène, car le rôle important revient à la faille rhénane plutôt qu'à la faille vosgienne. Les épisodes paroxysmaux se caractérisent par d'importants matériaux grossiers, sables et galets qui s'accumulent en cônes et zones « deltaïques » (très riches en gaz dans le nord du fossé allemand), suivis de périodes calmes où se déposent des argiles lacustres riches en matière organique (lignites et tourbes). Les calculs permettent alors de chiffrer la remontée des bordures, surtout pliocène, entre 300 et 700 m, et l'affaissement du fossé, surtout quaternaire, entre 300 et 400 m (Vogt, 1980), suivi par une remontée des bordures au Quaternaire moyen.

Ces mouvements, dont il est souvent difficile de faire la part respective, ont également entraîné le déferlement des plis du Jura vers le nord, sur le fossé disséqué par les failles méridiennes, et ceci dès le début du Pliocène. Une autre conséquence en est la réorientation du réseau hydrographique vers le sud-ouest (Doubs et Saône), quand le Sundgau s'affaisse à la fin du Pliocène, puis vers le nord (Rhin), quand les affaissements quaternaires effacent l'ancienne ligne de partage des eaux à la hauteur de Colmar et du Kaiserstuhl.

Depuis lors, depuis les glaciations quaternaires affectant les massifs bordiers, le paysage n'a guère changé. Le bloc rhénan avec son fossé semblerait avoir réalisé son équilibre isostatique; il n'en est rien, puisque *le fossé reste soumis à des contraintes multiples de distension (0,5 mm/an), de décrochement senestre (0,05 mm/an) et d'affaissement (0,2 à 0,7mm/an)*, valeurs largement supérieures aux moyennes de l'ensemble du Tertiaire.

2.1.3. Mécanismes géodynamiques de la taphrogenèse

Au départ, il y a deux faits : la remontée du bloc rhénan dès la fin du Jurassique et le volcanisme crétacé dès −100 MA.

1) Le soulèvement est-il un simple phénomène de rattrapage de l'équilibre isostatique ou déjà le résultat du bombement du Manteau supérieur ? Etant donné qu'à cette époque il ne peut être question de l'influence d'un orogène alpin profond, la fréquence du volcanisme crétacé-éocène mis en évidence dans le domaine rhénan milite pour un *processus de convection thermique dans le Manteau supérieur* et de fracturation de la Croûte. Si l'on se place à l'échelle du Globe et dans le concept de la tectonique des plaques, on peut aussi envisager qu'à l'Eocène la subduction alpine de la plaque africaine ait provoqué, plus au nord, des *bombements du Manteau jusqu'à moins de 30 km de profondeur*, alors que sous le bassin sédimentaire alpin ce Manteau est enfoui à 60 km de profondeur. L'important bombement dans la partie méridionale du bloc rhénan pouvait dès lors produire un « panache » thermique et un « point chaud » intraplaque. On a même parlé d'un « point triple » au croisement de plusieurs directions de fracturations, ce qui aurait entraîné l'affaissement crustal et plus tard l'intrusion volcanique du Kaiserstuhl.

2) Au sud-ouest du fossé rhénan, le large faisceau de failles de décrochement senestre correspond certainement à un grand décrochement crustal NE-SW. On l'a interprété comme une *faille transformante intracontinentale* (Illies, 1972; Sittler, 1974*a*; Bergerat, 1977) dont le mécanisme déclencherait l'effondrement des fossés rhénan, bressan et de la Limagne. En effet, c'est à partir de cette transformante qui joint deux régions à Croûte amincie (Moho à −24 km) que les différents effondrements vont se propager.

3) Il reste à expliquer l'allongement méridien de cette fracturation et l'origine de la distension latérale du fossé. On peut invoquer l'existence de deux « points chauds » (la région du Kaiserstuhl au sud et celle du Vogelsberg au nord) orientant la zone d'effondrement, mais on peut aussi invoquer, plus valablement, une ancienne zone de faiblesse subméridienne, le *linéament fondamental européen* que l'on suit de Marseille à Oslo, ainsi que sa ramification, assurée aujourd'hui, vers la Basse Rhénanie et la Mer du Nord (Central et Viking grabens). Quant à la distension latérale de 4 à 5 km au niveau du graben, elle est plus importante que celle qui résulte du bombement du bloc rhénan : on a pensé à l'effet de la poussée latérale des blocs qui s'effondrent, mais il est plus probable qu'il s'agisse d'un phénomène de dérive profonde dû à *l'amincissement de la Croûte inférieure* et à la faible densité de certains niveaux au-dessus du bombement du Manteau (canal lithosphérique).

4) Enfin, toutes ces interprétations s'accordent avec des *contraintes de compression subméri-*

diennes. Elles ont été calculées pour les temps éocènes et oligocènes : l'orientation N 20 a déclenché le processus d'accrétion, c'est-à-dire l'ouverture en direction perpendiculaire au fossé rhénan. Cette dérive latérale a cependant été interrompue à un stade relativement précoce de fissuration de la lithosphère, en raison de la rotation du champ de compression dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. A partir du Miocène, cette rotation des contraintes vers le NNW entraîne une extension en direction SW-NE, c'est-à-dire un coulissement ou un *décrochement senestre des bordures du fossé,* en particulier au Pliocène et au Quaternaire. Ceci explique l'indépendance du horst de Mulhouse dépourvu de failles de décrochement (RUHLAND, 1967) et le chevauchement de la couverture du Jura au Pliocène.

La direction des failles limites rhénanes dessine trois secteurs d'orientation différente du nord au sud (Fig. 6). De par les contraintes qui s'y exercent, ce sont maintenant les secteurs nord et sud du fossé qui sont soumis à un *décrochement avec distension latérale* donc à l'affaissement, alors que le secteur central, subissant les contraintes maximales, est soumis à un *décrochement par compression* qui provoque là une remontée du fossé. Ceci est confirmé par les mesures géophysiques et géodésiques actuelles (ILLIES & GREINER, 1979).

2.2. DISPOSITIONS STRUCTURALES ET PIÈGES PÉTROLIERS

Les exploitations minières, pétrolières à Pechelbronn et potassiques près de Mulhouse, nous ont rendus familiers des dépôts tertiaires dès le début du siècle. En revanche, il fallut attendre les données sismiques et gravimétriques modernes, après la Seconde Guerre mondiale, pour connaître le soubassement secondaire dont les structures tectoniques se projettent à travers la série tertiaire. Enfin, l'image structurale du socle cristallin et paléozoïque inférieur, à l'origine de l'effondrement du graben, vient seulement de se préciser grâce aux travaux géophysiques (EDEL, 1978).

2.2.1. Zones subsidentes, effondrements et sédimentations

L'importance et la nature lithologique des dépôts de remplissage du fossé étaient conditionnées par la *réactivation des bassins et seuils de la surface prétertiaire* (Fig. 4 et 5). Ces structures mésozoïques reflètent à leur tour, par leur distribution et leur orientation N 40 - N 60, l'image des structures hercyniennes (SITTLER, 1983). La disposition et l'ampleur des champs de fractures des bordures témoignent aussi de la remobilisation successive des mêmes structures de base (Fig. 6).

1) Dans ces champs de fractures, où affleurent tous les termes de la série mésozoïque, on observe le mieux la surimposition de la *tectonique rhénane,* les jeux d'affaissement et de décrochements N 20. Mais c'est aussi dans la sédimentation tertiaire du fossé qu'on lit ce gradient en direction rhénane. De plus, les bassins subsidents recueillaient des dépôts fins, argileux, salifères, tandis que sur les seuils se sédimentait un matériel généralement plus détritique, plus carbonaté, de plus grande porosité. Ces positions structurales plus ou moins élevées se sont maintenues actives jusqu'au Quaternaire; elles délimitent des zones hautes à gisements pétroliers.

2) Les *taux de sédimentation* de l'Éocène et de l'Oligocène inférieur sont, grosso modo, deux fois plus importants dans le sud de l'Alsace que dans le nord (Tabl. I); ils s'établissent en moyenne, respectivement, à 200 m et 100 m/MA, mais varient bien sûr en fonction des faciès et des fracturations synsédimentaires. Ce taux de 100 m/MA correspond curieusement à la valeur du rejet tectonique actuel du fossé : 5 000 m ± 500 m pour une durée d'environ 50 MA. Si le graben n'est pas comblé actuellement, c'est que : 1) les deux extrémités du fossé se sont effondrées l'une après l'autre, basculant du sud (Eo-Oligocène) au nord (Miocène), si bien que 2) lacunes et phénomènes d'érosion se rencontrent aussi bien au sud qu'au nord, et 3) la remontée des bordures durant la phase tardi-rift, phénomène d'isostasie, est beaucoup plus importante au sud qu'au nord (ROLL, 1979).

3) Dans ces *zones de bordure,* les dislocations sont dues à des failles normales, de direction rhénane N 20 et varisque N 45, compatibles avec la distension. Les failles vosgiennes (externes) sont synthétiques et leur pendage de 40-65° est généralement inférieur à celui des failles rhénanes (internes) dont la pente de 60-80° favorise aussi des rejets plus importants; ils dépassent souvent 1 000 m, alors qu'en bordure des Vosges les rejets n'atteignent que quelques centaines de mètres. La sismique a pu localiser ces failles jusqu'à 7-8 km de profondeur; au-delà elles « disparaissent » actuellement en raison d'un changement de phase dû au flux thermique élevé du fossé. Ce sont donc les failles rhénanes qui conduisent surtout l'effondrement du fossé et qui restent actuellement les

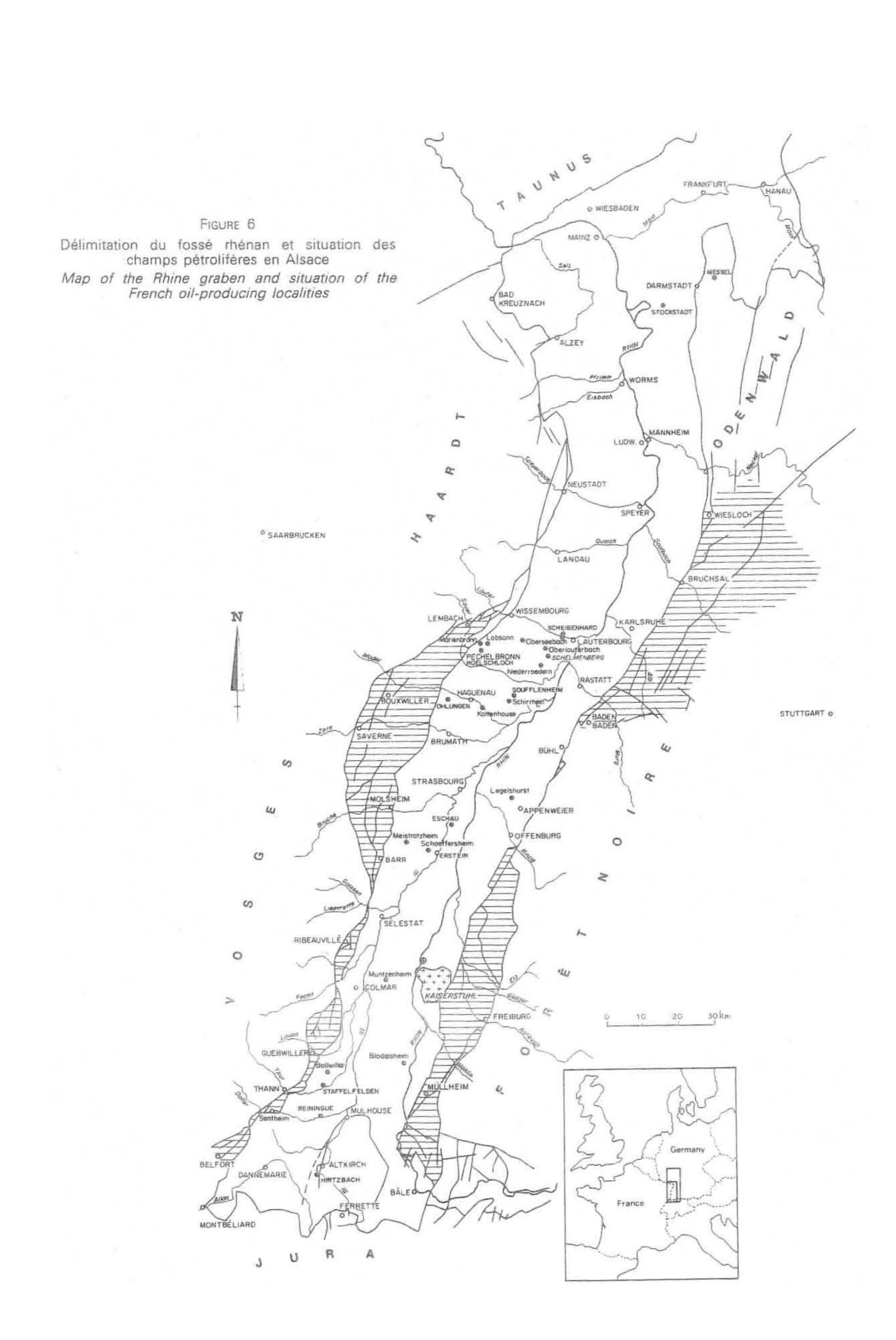


FIGURE 6
Délimitation du fossé rhénan et situation des champs pétrolifères en Alsace
Map of the Rhine graben and situation of the French oil-producing localities

plus actives, bien que peu visibles dans la topographie, au pied des avant-monts (Fig. 6).

4) Cette ligne de faille rhénane a toujours été la principale zone de rupture d'équilibre en raison de la nature des matériaux qui s'y juxtaposent : calcaires et grès mésozoïques du côté des champs de fractures, marnes du Tertiaire du côté du fossé subsident. C'est également dans cette zone, ayant sans doute joué assez souvent en flexure, qu'une *avant-fosse tectonique* a été mise en évidence (SITTLER, 1965, p. 190). Les mouvements de distension ont créé un petit graben étroit, plus actif que le grand fossé voisin. Dans cette gouttière, longeant le bord des collines, ont été piégés les apports grossiers provenant de l'ablation tertiaire des bordures. La frange de conglomérats côtiers, visible en bordure des collines sous-vosgiennes, constitue le trop-plein non enfoui ou préservé sur les marges de la fosse.

Cette zone d'avant-fosse tectonique peut être intéressante du point de vue pétrolier, de par sa mobilité et ses fracturations favorisant les migrations d'huile, mais aussi de par la nature poreuse et perméable des dépôts sédimentaires (gisement d'asphalte de Lobsann, champ d'Ohlungen). A l'inverse, ce réservoir peut être facilement contaminé par les eaux météoriques s'il est dépourvu de couverture (Fig. 7).

Un autre type de dépôt littoral, lié aux régions structuralement moins actives, est constitué par un *éventail de chenaux fluviatiles continentaux ou sous-marins*, de type deltaïque, un modèle réduit de « deep sea fan ». L'exemple type en est le bassin de Pechelbronn, dont la structure périclinale montre bien le rôle moteur des failles à l'intérieur du fossé et son incidence sur la migration et le piégeage du pétrole (Fig. 8).

2.2.2. Champs de failles et champs de pétrole

A *l'intérieur du fossé*, l'évolution tectonique peut être ou non tributaire des accidents préexistants. Si les failles des bordures du fossé, y compris celles des champs de fractures, se prolongent indubitablement dans le socle, nous pouvons soupçonner la même chose pour une partie du réseau faillé très complexe qui hache le remplissage du fossé (Fig. 7 et 8). Les nombreux forages et études géophysiques ont montré que les structures de l'effondrement rhénan sont relativement uniformes dans l'ensemble du graben (SITTLER, 1967, 1974 *a*).

1) Toutes ces failles sont normales, quel que soit leur âge, leur direction ou leur pendage; elles traduisent donc la distension. La naissance ou le rejeu des failles est en grande partie synsédimentaire. C'est le cas des *failles de direction rhénane*, les plus nombreuses et les plus anciennes; on les qualifie ainsi de failles principales, car elles découpent le fossé en lanières subméridiennes. Une autre direction de failles, NNW, est relativement fréquente, son obliquité par rapport à la direction rhénane (symétrie par rapport au nord) reflète le déplacement horizontal senestre des bordures. Ce décrochement affecte probablement aussi certaines failles à l'intérieur du fossé, mais il ne peut se vérifier avec certitude (Fig. 9).

Pour ce qui est du pendage, il faut distinguer a) les failles synthétiques d'effondrement dont le nombre est relativement faible, mais augmente à mesure que l'on se dirige vers l'axe du fossé, et b) les failles antithétiques majoritaires dans toute la largeur du fossé. Ces failles antithétiques à pendage 40-65° W définissent le *style à rejet compensateur*, tout à fait caractéristique de l'ensemble du fossé rhénan. Elles séparent des panneaux monoclinaux, inclinés de 4 à 9° vers l'est, et dont l'effondrement se trouve ainsi freiné. Cette disposition permet l'adaptation des terrains aux mouvements de distension, et pour ce qui nous intéresse, elle crée des zones hautes où les couches sont piégées en amont-pendage. En Alsace, le plus bel exemple en est la *zone périclinale de Pechelbronn*, mais pratiquement tous les autres champs sont conformes à ce modèle (Fig. 8). Les structures en dômes anticlinaux sont exceptionnelles et dues aux remontées diapiriques de sel ou bien aux bombements du substratum mésozoïque. Le plus souvent il s'agit de demi-dômes piégés par une faille antithétique à regard W (à regard E dans l'extrême nord du fossé).

2) Associées aux grandes failles antithétiques ou synthétiques, se trouvent des failles inclinées en sens inverse (regard E principalement) et qui recoupent ou non les premières; ce système de *failles conjuguées* traduit l'adaptation des terrains aux mouvements de distension W-E. Le recoupement secondaire apparaît alors souvent comme la fracturation majeure; en effet, il se situe principalement à la phase miocène d'effondrement septentrional et de soulèvement méridional du fossé. Par ailleurs, c'est aussi à ce moment là, ou bien quand le fossé entre définitivement dans le domaine continental, que l'on constate de nouveaux faisceaux de failles qui se greffent parallèlement sur les anciens accidents majeurs. Tout ceci aboutit à de nouveaux pièges pétroliers dont la complexité est fonction du nombre de failles et de leur faible équidistance (Fig.9).

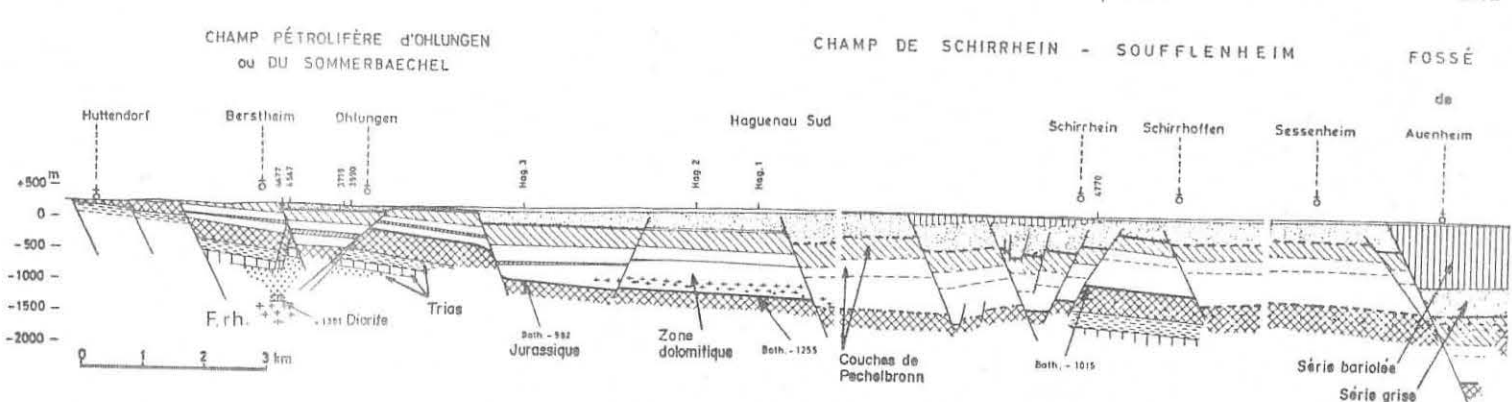


FIGURE 7

Coupe géologique du champ pétrolifère d'Ohlungen en bordure de la faille rhénane (gisements dans le Keuper, le Dogger et les Couches de Pechelbronn) et des champs de Schirrhein et Soufflenheim (productifs dans les Couches de Pechelbronn). — Voir tracé de la coupe, Fig. 9

Geological cross section of the Ohlungen oil field close to the Rhenish main fault (fore-deep and high-zone) and of the Schirrhein and Soufflenheim oil fields, structural terraces on the western side of the central trough. — See map Fig. 9

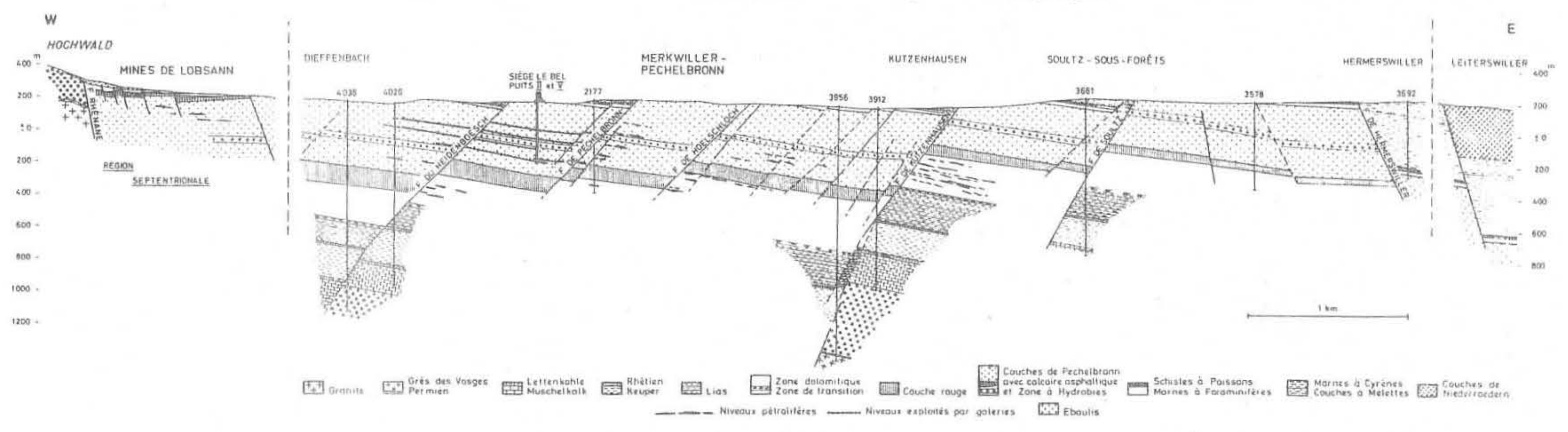


FIGURE 8

Coupe géologique à travers le champ de Pechelbronn et la région des mines d'asphalte de Lobsann, avec indication des failles principales à rejet compensateur. (Voir l'emplacement de la coupe, Fig. 9)

Cross section of the Pechelbronn oil field and the Lobsann asphalt mining areas. The high structural position with respect to the subsiding graben results from the collapse steps of antithetic Rhenish orientated faults. Note the mining galleries in the Tertiary sands (see Fig. 9)

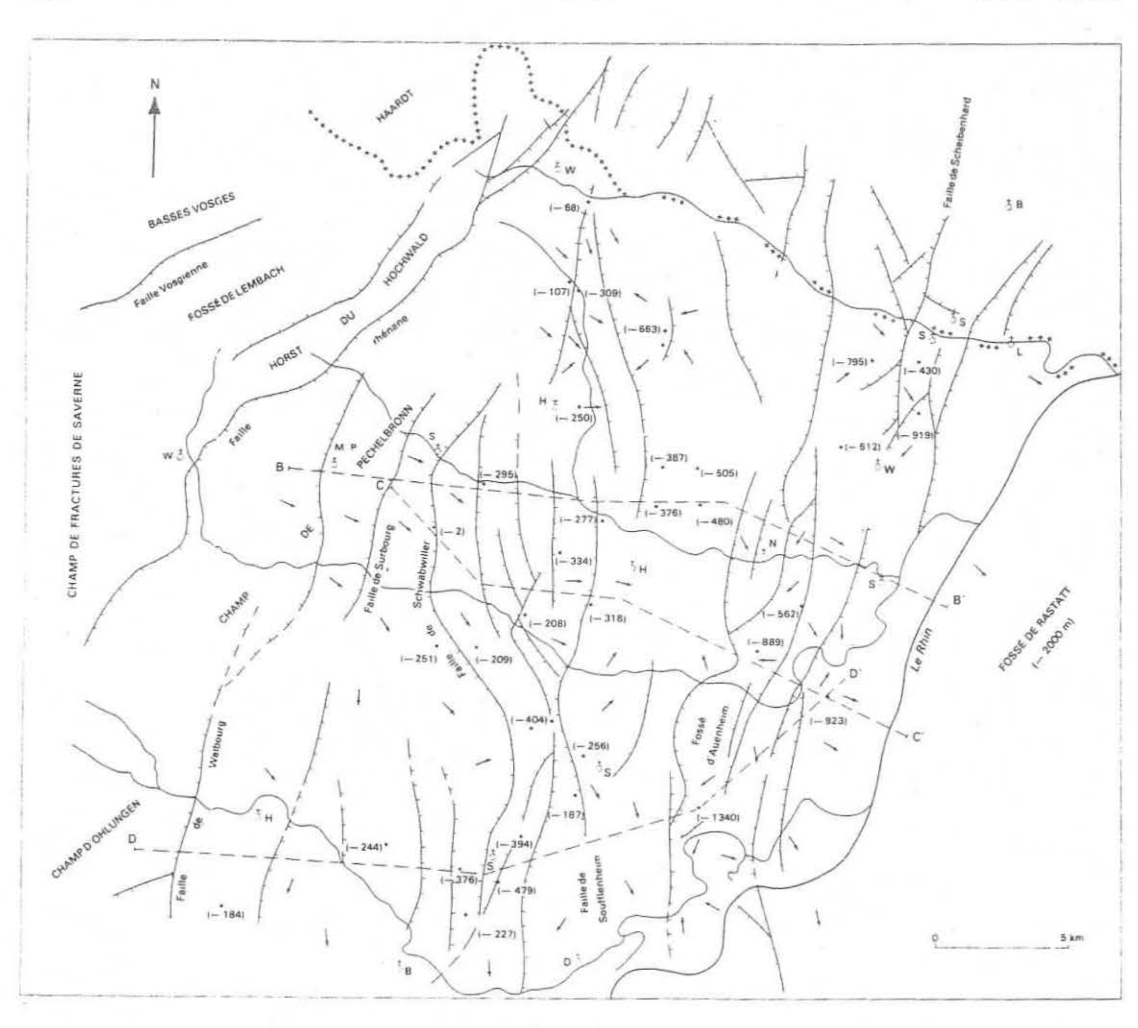


FIGURE 9

Carte structurale simplifiée des principales failles au toit des Couches de Pechelbronn (base du Rupélien), à l'extrémité NE de l'Alsace où se situent les principaux champs pétrolifères. Les chiffres indiquent la profondeur et les flèches le pendage des divers compartiments. Situation voir Fig. 6
B : tracé de coupe *p.p.* Fig. 8 — D : tracé de coupe *p.p.* Fig. 7

Map of north-eastern Alsace, the area with the most important oil fields. Only the principal faults are drawn, note their Rhenish (N 20), north and N 160 (symmetrical) orientation. Reference horizon is basis Rupelien. For cross sections B and D, see Fig. 8 and 7.

Il faut aussi constater que le pendage des failles s'accentue (knick) dans les terrains mésozoïques, qu'il s'agisse d'anciennes failles ou de failles récentes affectant ce soubassement (Fig. 8). Ceci s'explique par la mécanique des roches : la surface prétertiaire est bien plus indurée que les terrains tertiaires, eux-mêmes réagissant de façon différente selon leur nature plus ou moins souple. Ainsi, dans le bassin salifère de Mulhouse les flexures prédominent et les failles, surtout post-oligocènes, ont un pendage très faible.

3) La valeur des rejets des failles à l'intérieur du fossé est très variable, de quelques mètres à 600-800 m. L'activité synsédimentaire d'une faille a généralement diminué au cours des temps. Au voisinage de la lèvre abaissée, il y a souvent condensation de la sédimentation. A côté des

failles tardi-rift qui sont postérieures à l'ensemble des dépôts, et des *failles syn-rift* n'ayant joué que pendant un temps très court, nous avons l'exemple de failles importantes dont l'activité s'est arrêtée : 1) à l'Éocène inférieur ou moyen, après les premières distensions, 2) à l'Oligocène inférieur avant la transgression rupélienne, 3) à la fin du Chattien (Couches de Niederroedern) ou de l'Aquitanien (« Couches à Hydrobies supérieures »). Ceci pourrait indiquer des *variations de contraintes tectoniques (rotation) au cours du temps* : à chaque phase majeure, un certain nombre de failles de la phase précédente auraient ainsi cessé de jouer en raison de leur orientation inadéquate.

4) La plupart de ces faits tectoniques pouvaient être observés dans les mines de Pechelbronn, comme cela est encore possible aujourd'hui dans les mines de potasse du Haut-Rhin. On change alors d'échelle et l'on s'aperçoit qu'à côté des failles principales, révélées par la géophysique, une multitude de petites failles hachent littéralement les couches, parfois à 1 m de distance les unes des autres (HERVÉ & CAILLEUX, 1962) Dans le champ de Pechelbronn, les fractures et fissures infiniment petites qui traversent les marnes ont livré le passage aux fluides (Fig. 1); les filonnets minéralisés et la décoloration des marnes en sont des preuves. La teneur en bitumes des marnes rayées de Pechelbronn passe de 3 % à moins de 1 % au voisinage des bancs sableux imprégnés d'huile. Mais toutes les lentilles sableuses ne sont pas imprégnées (Fig. 2); certaines sont purement aquifères, généralement quand les marnes qui les entourent apparaissent compactes et non litées. A proximité des failles d'amont-pendage, les lentilles sont les mieux saturées d'huile (25-30 % selon leur porosité); en aval-pendage, on trouve dans le même horizon stratigraphique des huiles de plus en plus lourdes et de plus en plus d'eau, jusqu'à ne rencontrer plus que de l'eau de gisement. Pour un même niveau de réservoir, la composition chimique, saline, des eaux diffère d'un compartiment structural à l'autre, preuve d'un blocage précoce de ces petits réservoirs.

5) Ces structures tectoniques, petites ou grandes, ont donc fortement influencé la migration et la mise en place de l'huile. *On pourrait alors admettre que les grandes failles, parfois tardives, limites de blocs structuraux relativement mobiles, sont restées ouvertes et ont pu laisser échapper les hydrocarbures ou les contaminer; les failles synsédimentaires, au contraire, scellées par la pression latérale des différents compartiments, ont préservé les roches mères et les réservoirs.* L'huile est piégée dans les niveaux gréseux ou calcaires et les lentilles sableuses, qui viennent buter contre les failles de relèvement étanches, soit parce qu'elles sont cimentées, soit par le contact avec un terrain argileux ou salifère. Les anciens mineurs de Pechelbronn avaient déjà remarqué, au siècle dernier, que les gisements les plus riches s'orientaient en direction NNE (Fig. 11); leurs travaux d'exploitation suivaient la direction rhénane, celle des failles principales découvertes 50 ans plus tard. Il en est de même des autres structures pétrolières mises en évidence dans le rift rhénan (Fig. 13, 16, 17 et 18).

2.2.3. Origine tertiaire et/ou mésozoïque du pétrole

Si les réservoirs d'huile se situent à la fois dans les terrains tertiaires et dans ceux du Mésozoïque, nous avons également des horizons de roches mères certaines, aussi bien dans les dépôts tertiaires de l'Éocène au Miocène, que dans le substratum liasique, le Toarcien en particulier. Il n'empêche que la « querelle » entre les défenseurs de l'huile tertiaire et ceux de l'huile mésozoïque rebondit encore aujourd'hui. Quatre faits, acquis successivement dans le temps, permettent de progresser dans le raisonnement :

1) *Les quantités d'huile extraites* des terrains tertiaires (même en soustrayant la surexploitation minière du champ de Pechelbronn) sont incomparablement supérieures (20 à 30 fois au moins) à celles provenant des réservoirs mésozoïques (SITTLER, 1972, 1974 *b*). De là, les premières conclusions attribuant une origine exclusivement tertiaire aux huiles (DE SITTER, 1939; SCHNAEBELE, 1948), et ceci d'autant plus que :

2) *La structuration tectonique* de l'ensemble du fossé, dont nous avons acquis une connaissance quasi-parfaite, admet des migrations secondaires d'huile, aussi bien du Tertiaire vers le Mésozoïque qu'inversement. Chaque cas particulier peut s'expliquer soit par la contiguïté des terrains juxtaposés par failles, soit par la circulation dans les réseaux faillés complexes, y compris les migrations *per descensum*. Les arguments en faveur de l'origine mésozoïque semblent donc aussi solides que ceux pour l'origine tertiaire, sauf dans les régions septentrionales du fossé où les roches mères du Lias ont été érodées au Crétacé. Dans le fossé méridional, au contraire, où le Mésozoïque est préservé, la rareté et le peu d'importance des réservoirs de cet âge (se trouvant à proximité de la roche mère liasique) restent

troublants. Mais l'absence d'huile dans les réservoirs potentiels du Tertiaire, au sud de Strasbourg, est tout aussi inexpliquée.

3) *Les analyses géochimiques des huiles brutes*, loin d'être homogènes à l'intérieur d'un champ, permettent de distinguer des huiles de deux types (LOUIS & BIENNER, 1953; BAUDERER & LOUIS, 1958) :

— le type paraffinique (C/H = 6,2 à 6,3; P. mol. moyen = 320; d. moy. = 0,84) caractérise les huiles des réservoirs du Trias et du Jurassique, sauf exception;

— le type mixte, intermédiaire entre le type paraffinique et le type naphténique, (C/H = 6,9 à 7,1; P. mol. moyen = 340; d. moy. = 0,89) caractérise les réservoirs tertiaires, avec aussi quelques exceptions.

Les deux origines possibles de l'huile du fossé rhénan sont donc démontrées (Fig. 10). Et en même temps, on montre que certaines huiles de réservoirs triasiques et jurassiques (Rot, Ohlungen, Eschau) sont en réalité de type mixte, donc tertiaires. A l'inverse, des migrations d'huiles mésozoïques vers un réservoir tertiaire existent; c'est le cas, probablement de l'huile des Couches de Pechelbronn dans le champ de Scheibenhard; mais l'huile paraffinique des mêmes niveaux à Stockstadt, à l'extrémité nord du fossé, ne peut provenir du Mésozoïque, absent dans tout ce secteur; par contre, des schistes bitumineux, identiques à ceux de Messel de l'Éocène moyen, ont été mis en évidence à Stockstadt entre le Permien et l'Oligocène (STRAUB, 1962). Les gisements de gaz de cette région sont significativement liés au profond enfouissement d'autres roches mères, oligo-miocènes, elles.

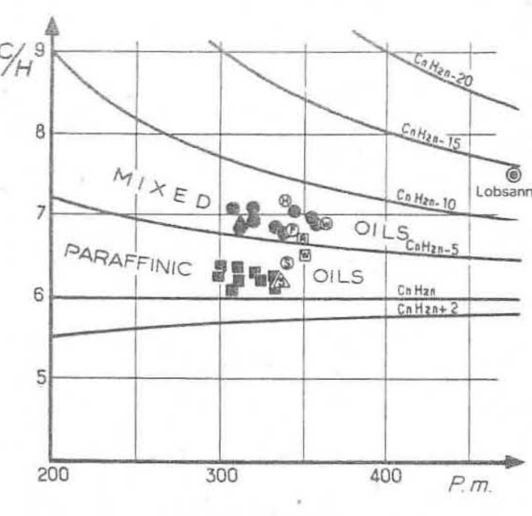


FIGURE 10

Les deux types d'huile brute du fossé rhénan : de base paraffinique dans les terrains mésozoïques (carrés noirs), de base mixte dans les terrains tertiaires (ronds noirs). Les exceptions (points clairs) sont dues aux migrations (d'après BRUDERER & LOUIS, 1958, modifié)

Classification of oils from the Rhine graben reservoirs, according to a C/H versus Molecular weight diagram. With some exceptions due to migration, the paraffinic type belongs to Mesozoic horizons, the mixed one to the Tertiary

4) *La maturation thermique* insuffisante des roches mères du Tertiaire a aussi été invoquée pour les deux tiers méridionaux du fossé. Cet argument est déjà réfuté au début de ce travail, puisque dans une région géothermiquement chaude, ces terrains étaient encore assurés d'une surcharge de 1 000 à 1 500 m, érodée seulement depuis le Miocène supérieur. Le degré de diagenèse de la matière organique dans le fossé rhénan est beaucoup plus élevé qu'ailleurs : les « lignites » sapropéliques de Bouxwiller, de l'Éocène moyen, ont un pouvoir réflecteur de 0,60 % ce qui les place à un stade de maturité proche des houilles; certaines tourbes plio-quaternaires ont déjà atteint le pouvoir réflecteur des lignites (TEICHMÜLLER, 1970).

Mais pour les Zones bitumineuses du Haut-Rhin, l'argument du manque de profondeur d'enfouissement pourrait être invoqué puisqu'aucun réservoir tertiaire n'a été découvert là; les faciès salifères et argileux, différents de ceux du nord, n'offraient pas non plus de bonnes conditions de réservoirs. Enfin, la remontée précoce de cette partie du fossé, accompagnée de distension et de fracturation intense a sans doute laissé échapper le peu d'huile mature dont on retrouve des traces dans les fissures des roches tertiaires.

Nous sommes donc certainement en présence d'huiles mésozoïques et d'huiles tertiaires. Les eaux de gisement, dont on a noté la concentration et la composition variables selon les compartiments tectoniques, montrent l'importance relativement faible des circulations entre les réservoirs une fois constitués. En ce qui concerne les roches mères mésozoïques, il est impossible de savoir si la couverture du Lias, épaisse de 400 m au maximum, était suffisante pour générer l'huile au Jurassique supérieur, avant et pendant la continentalisation crétacée. Cette période de presque 100 MA d'émersion, de plissement et d'érosion est parfois déclarée responsable de la perte d'importantes quantités d'huiles mésozoïques lessivées ou dégradées (BRUDERER & LOUIS, 1958). Certes, des

conglomérats imprégnés de bitume ont été trouvés dans le Haut-Rhin à la base du Tertiaire et pourraient donc provenir d'un réservoir (peut-être plus ancien que le Lias) alors déjà en place et soumis à l'érosion. Par ailleurs, l'hypothèse d'un grand « water flooding » au moment de la transgression tertiaire (BRUDERER, 1956) ne cadre plus avec nos connaissances paléogéographiques et tectoniques actuelles.

En revanche, il est certain que lors de la surcharge tertiaire du graben et de la fracturation active et irrégulière au cours de cette ère, les grandes failles ont contribué à la fuite et à la dégradation des huiles mésozoïques et tertiaires. Ainsi, l'origine du gisement asphaltique de Lobsann ne peut s'expliquer que par l'arrivée d'huiles brutes, de façon irrégulière, dans le lac adossé à la faille rhénane (Fig. 8). Les circulations dans ce faisceau de failles, qu'elles proviennent des Couches de Pechelbronn ou du Lias sous-jacent, ont rassemblé l'huile, évoluant vers les naphtènes, justement dans cette partie du lac, où par ailleurs la richesse en fossiles calcaires diminue également (SITTLER, 1982). De nos jours encore, dans le fossé rhénan où l'exploitation pétrolière a fortement réduit les pressions de gisement, on constate toujours des indices et suintements d'huile en surface et en liaison avec certaines fractures.

Toutes les observations, analyses et réflexions qui précèdent nous font admettre des genèses et réserves d'huile mésozoïque beaucoup moins importantes que celles du Tertiaire.

3. — LA RECHERCHE PÉTROLIÈRE EN ALSACE DE 1735 À 1985

3.1. PECHELBRONN, BERCEAU DE L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE

Entre la commune de Lampertsloch et celle de Merkwiller existaient de tout temps des indices superficiels d'hydrocarbures (Fig. 11). Depuis la fin du XVe siècle au moins, les paysans écopaient de l'huile très asphaltique sur les eaux d'une source dénommée pour cette raison « Pechel-Bronn », c'est-à-dire « source de poix ». Ce précieux bitume servait à graisser les roues des chariots, à alimenter les lampes, mais aussi à des fins médicinales. Les premiers essais d'exploitation directe des sables bitumineux datent de 1627 (DE CHAMBRIER, 1919; SCHNAEBELE, 1948). Les vicissitudes et le rayonnement de cette industrie pétrolière en pays rural ont fait l'objet d'études de synthèse en 1974 (Saisons d'Alsace, n° 52).

3.1.1. L'exploitation minière de 1735 à 1888

Successivement dirigés par Eyrini d'Eyrinis, de La Sablonière et quatre générations de la famille Le Bel, les travaux d'extraction des sables asphaltiques par puits et galeries de mines constituaient un « privilège royal exclusif » accordé en 1740 (Fig. 12). L'extraction se faisait par seaux et le transport s'effectuait par brouettes vers le « laboratoire » où on lavait les sables à l'eau bouillante et purifiait le bitume pour obtenir le produit sous le nom de *graisse d'asphalte*. Après qu'Antoine Le Bel ait repris la manufacture de Pechelbronn en 1770, les mines tracèrent leurs galeries de plus en plus profondément, jusqu'à 100 m environ, en suivant les veines de sables (appelées boyaux) qui se trouvaient sur plusieurs niveaux séparés par des marnes imperméables.

En 1813, on implantait le premier sondage, suivi aussitôt par d'autres sondages au rythme de 2 à 7 par an; faits à la tarière, ils devaient reconnaître le terrain pour l'orientation des galeries de mines. La recherche d'un meilleur rendement en profondeur fit découvrir, à plus de 77 m, une huile de suintement qui s'écoulait librement des sables : la *graisse vierge*. Dès 1865, on s'orientait vers ce nouveau type de production, plus rentable que le dépilage des sables qui cessait en 1875, et ce procédé d'exploitation, tout en s'améliorant techniquement, sera conservé jusqu'à la fermeture définitive des mines en 1963. En 1879, le système de forage Fauvelle, à main, fonctionnant à l'injection d'eau et par battage, permettait d'atteindre une profondeur de 420 m. Enfin, l'huile sous pression jaillit en 1880 et 1882 de deux sondages profonds; ce moyen d'exploitation permit d'obtenir directement une *huile brute*.

En 1888, quatre générations de Le Bel s'étant succédé à la direction de l'entreprise, celle-ci fut vendue à la société alsacienne « Pechelbronner Ölbergwerke »; le bilan de cette première période d'exploitation par mines s'établissait à 28 puits, 286 sondages, 45 km de galeries, 49 473 t de produits dont 27 087 t d'huile brute.

3.1.2. L'exploitation par sondages de 1889 à 1916

L'évolution des techniques de sondage et les résultats encourageants obtenus déclenchèrent une véritable *fièvre du pétrole*. Les spéculations allaient bon train et plusieurs entreprises concur-

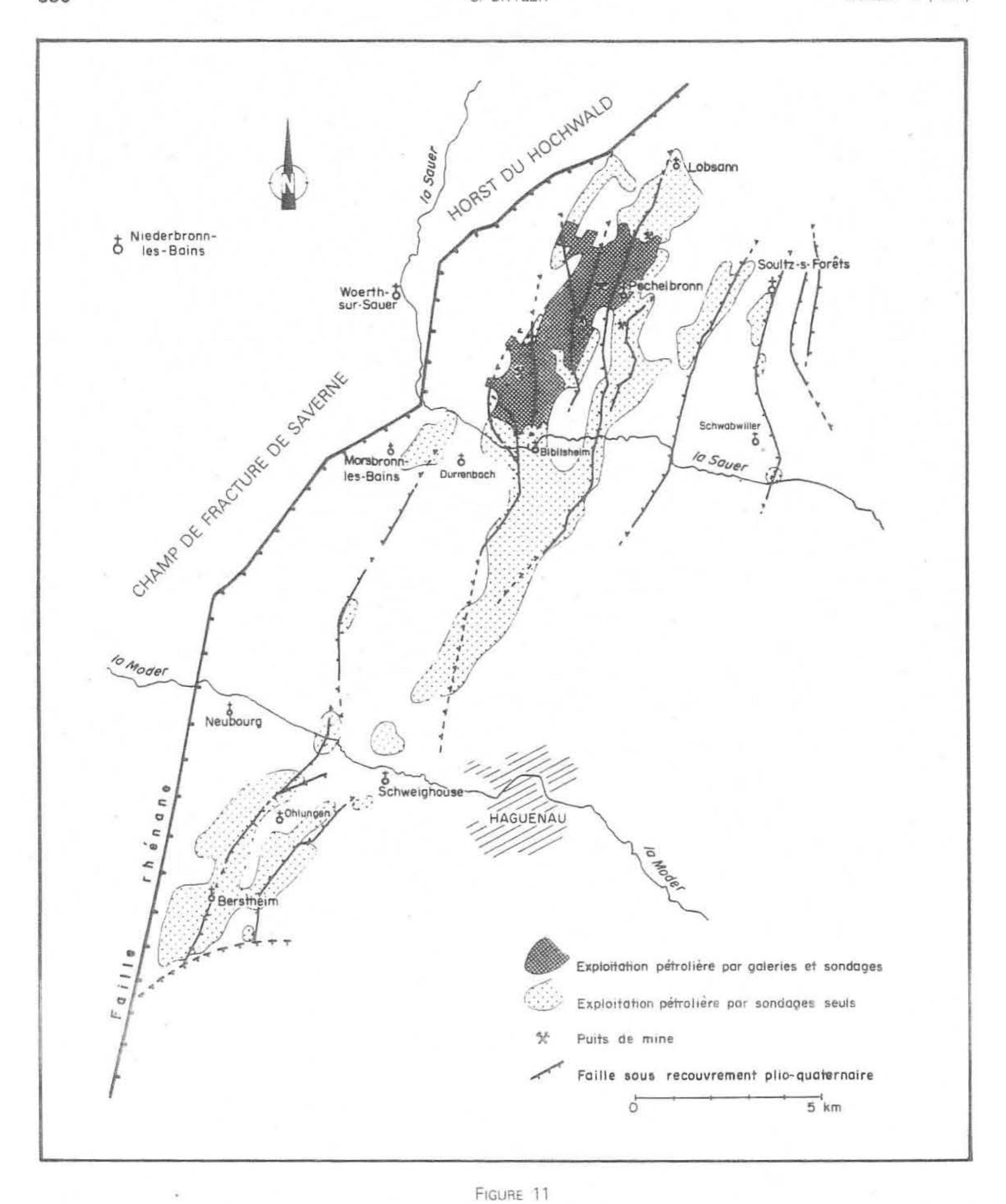


FIGURE 11

Carte du champ pétrolifère de Pechelbronn : étendue, situation structurale et modes d'exploitation

The Pechelbronn oil field : extent, principal fault structures and comparison between mining area and well drilling zones

rentes de Pechelbronn voyaient le jour à Soultz, Schwabwiller, Biblisheim-Oberstritten, Durrenbach et Ohlungen. La « Gewerkschaft Gute Hoffnung » et « l'Elsässische Petroleum Gesellschaft » se partageaient ces nouveaux champs, d'abord indépendants, jusqu'à ce qu'une direction allemande réunisse les deux sociétés à celle de Pechelbronn, sous le nom de « Vereinigte Pechelbronner Ölbergwerke », en 1906.

L'augmentation de la production enregistrée dès 1890 était due à un meilleur outillage, mécanisé au lieu d'être manuel (Systèmes Holcroft, Racky, Trauzl, forant à l'injection et capables de prélever des carottes), ainsi qu'à l'emploi de la technique de pompage testée sur le champ d'Ohlungen en 1885.

L'implantation des sondages se faisait souvent selon une maille de 10 m, quand un sondage de

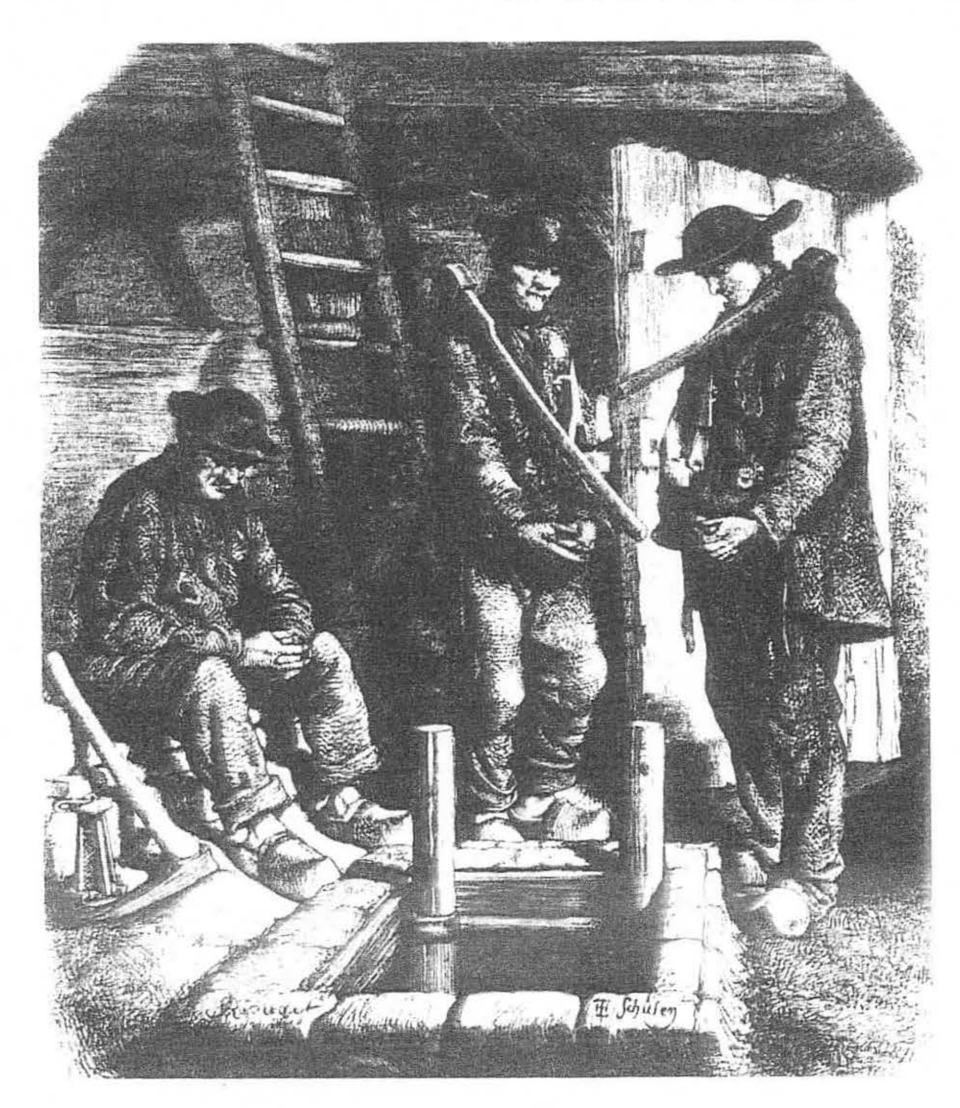


FIGURE 12

« La prière des mineurs » avant leur descente dans le puits (Grisaille à l'huile de Théophile SCHULER, 1863, représentant une installation de Pechelbronn au milieu du XIXe siècle)

Miners praying before going underground at a Pechelbronn mine shaft

reconnaissance avait détecté une zone imprégnée. L'évolution des *connaissances géologiques* a également contribué à une recherche plus orientée : les successions stratigraphiques commençaient à être entrevues, ainsi que les variations de faciès dans les Couches de Pechelbronn productives. La production annuelle passait de 6 531 t en 1889 à 49 584 t en 1913, chiffre record avec 29 tours de forage en activité (Fig. 13).

En 1916, avec 48 tours en service, le bilan pour la période d'exploitation par sondages s'établissait à 760 000 mètres forés dans 2 850 sondages ayant produit 717 127 tonnes d'huile brute. Il faut aussi ajouter qu'en 1904 et 1910, un sondage dans le champ de Durrenbach, puis un autre dans celui de Pechelbronn, ont vu jaillir des *eaux thermales* du Trias qui ont donné naissance, respectivement, aux stations de Morsbronn-les-Bains et de Merkwiller-Pechelbronn (SITTLER & WESTPHAL, 1974).

3.1.3. L'exploitation simultanée par mines et par sondages profonds de 1917 à 1962/64.

Au lendemain de la Première Guerre mondiale, les besoins accrus en huile minérale attirèrent l'attention sur les travaux de l'ancien directeur de Pechelbronn, P. de Chambrier, selon lesquels des quantités importantes d'huile restaient prisonnières des grains de sable, après épuisement par sondage.

1) *Les opérations minières* reprirent donc à une échelle beaucoup plus vaste qu'avant 1888 (Fig. 11 et 14). Avec une rapidité extraordinaire, 5 puits furent creusés se répartissant sur 3 sièges d'extraction (Tabl. II). En 1921, ils furent amodiés à la nouvelle « Société anonyme d'exploitations minières, Pechelbronn ». Il est intéressant de noter que les galeries, d'abord creusées dans les couches sableuses pour récupérer toute l'huile par dépi-

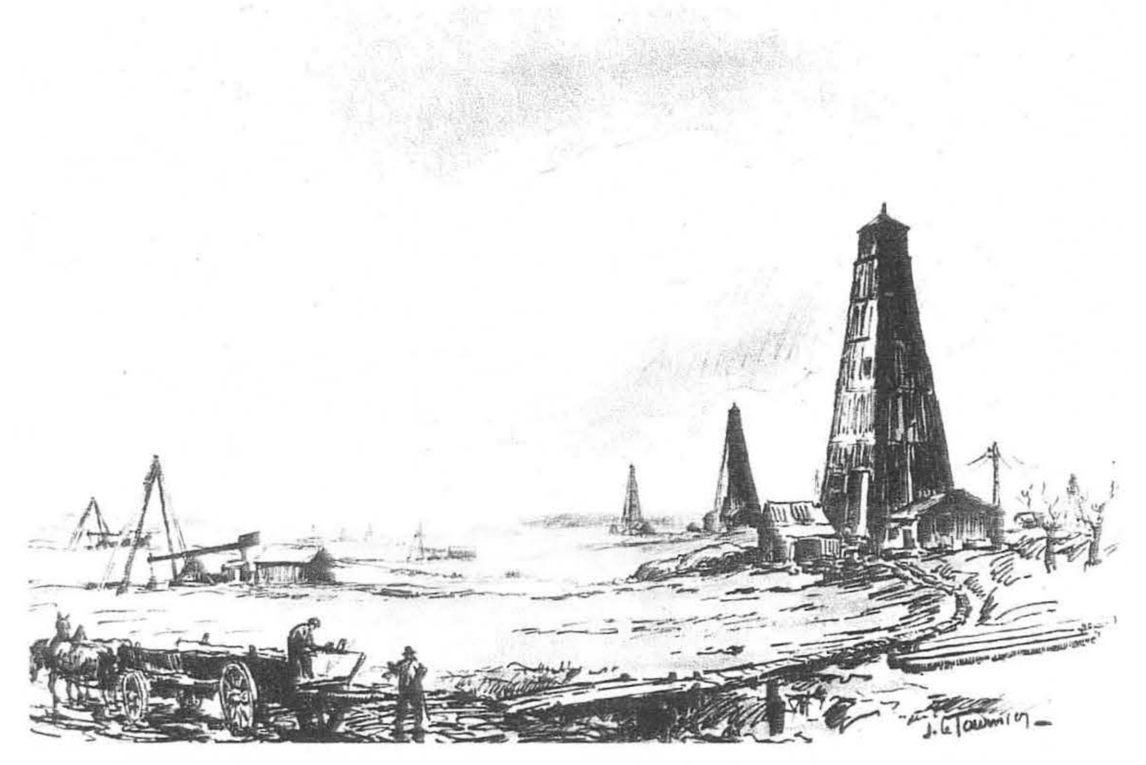


FIGURE 13

Le paysage aux environs de Merkwiller-Pechelbronn au temps de sa gloire pétrolière (dessin rehaussé d'aquarelle de J. LE TOURNIER, 1936)

Pechelbronn landscape painting, between World Wars One and Two

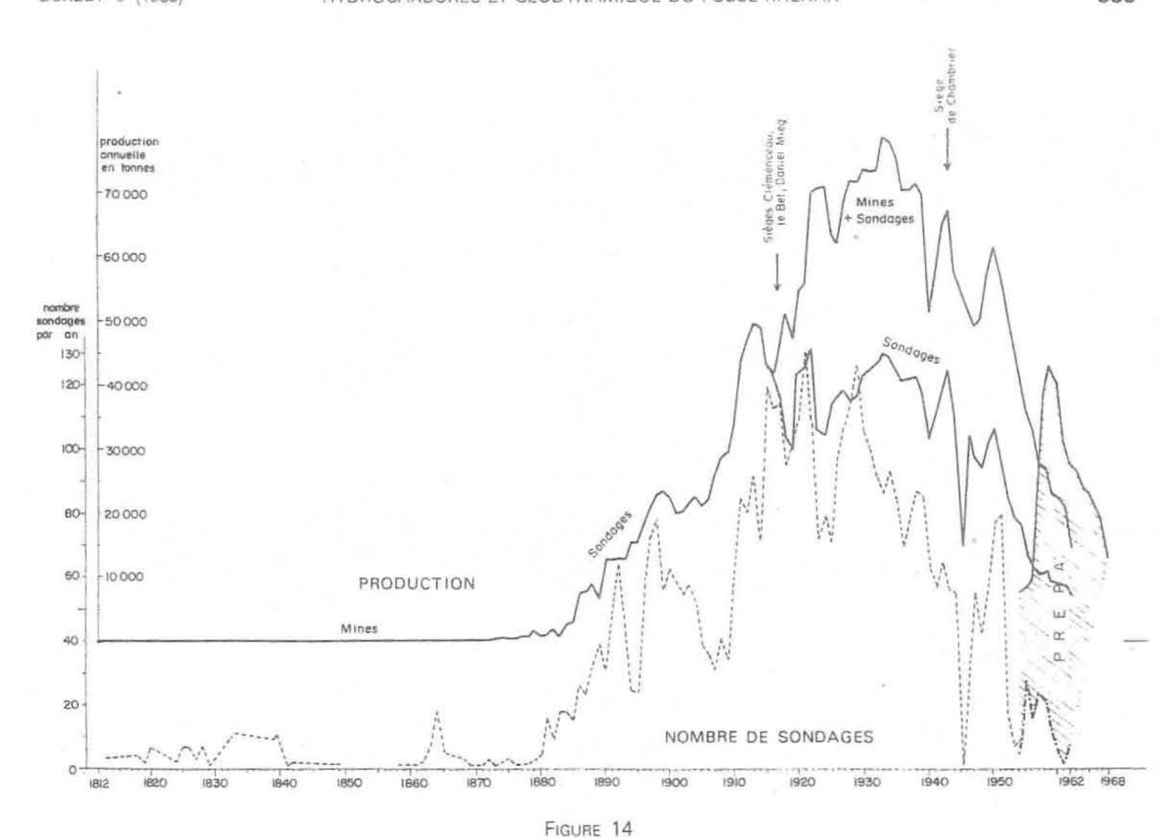


FIGURE 14

Bilan de l'exploitation pétrolière en Alsace de 1812 à 1968. Corrélation entre le nombre de sondages et la production d'huile, influence de l'exploitation minière moderne et de la reprise des travaux par la Société PREPA

Oil-production balance in Alsace from 1812 to 1968 versus number of wells drilled. The highest production curve indicates the time of simultaneous mining and drilling, mostly in the Pechelbronn area

lage, ont ensuite été assises dans les marnes au-dessus des sables, traversés par des puisards tous les 10 mètres. Vers 1950 enfin, les galeries étaient tracées entre deux couches réservoirs; des sondages au toit et au mur de la galerie recherchaient alors les gisements lenticulaires, en y plaçant des drains ou des pompes. Les principaux horizons producteurs étaient au nombre de 7 dans les Couches de Pechelbronn et 1 dans la Zone dolomitique. La productivité était de deux tonnes d'huile par mètre de galerie creusée.

Etant donné qu'il fallait maintenir ouvertes toutes les galeries, l'observation directe, *in situ*, des accidents structuraux et des réservoirs pétrolifères constituait la grande attraction pour les géologues et pétroliers venus du monde entier (Fig. 15). Le procédé d'exploitation original donnait également lieu à des quantités de publications faites le plus souvent par les visiteurs américains. Véritable musée naturel d'une propreté remarquable, les galeries ne servaient donc qu'à la circulation du personnel et au passage des canalisations d'huile.

Bien qu'un nouveau siège ait été mis en service sous l'occupation allemande, le manque de réserves dans la concession minière allait la condamner. Trois sièges furent progressivement fermés en 1962, le quatrième (Le Bel), en janvier 1963. On avait alors creusé 425 km de galeries sur une superficie de 1 250 ha. De 1917 à 1962, 1 098 886 t d'huile ont été drainées ou pompées dans la mine.

2) Entre-temps, l'*exploitation par sondages* a été quelque peu délaissée. Mais ensuite on poussa les recherches en profondeur et l'on découvrit les niveaux pétrolifères du Mésozoïque. Leur compréhension exigeait une meilleure connaissance géologique et tectonique. La géophysique vint au secours dès 1925. C'est en effet à Pechelbronn que les frères Conrad et Marcel

TABLEAU II

Les quatre sièges des mines de Pechelbronn en activité jusqu'en 1963. Le puits VIII n'a jamais été équipé pour l'exploitation

Industrial underground mining at Pechelbronn SAEM, till 1963. Number of mine shafts and extraction levels (in meters) within the Couches de Pechelbronn and Zone dolomitique (see Tabl. I)

Sièges	Puits	Etages	Profondeur en mètres
Clemenceau (1917)	I	1er	151,6
	IV	1er 2e	154,1 207,5
Le Bel (1918)	II	1er 2e 3e 4e	178.8 237,4 360,5 391,4
	V	1er 2e	178,3 233,8
Daniel Mieg (1918)	III	1er interméd. 2e	195,7 367,7 401,6
	VII	1er interméd. 2e	190,5 363,2 396,6
De Chambrier (1943)	VI	1er 2e	318,1 400,1
Puits VIII (1948)			env. 400 m

Schlumberger mirent à l'épreuve leurs premiers appareils de prospection électrique de surface, puis le carottage électrique des sondages, en 1927, repérant la nature des terrains, pétrolifères ou aquifères, leur pendage, la présence de failles et leur inclinaison. Dès 1928, puis en 1949, des prospections gravimétriques furent réalisées sur toute l'Alsace, affinées, grâce aux instruments modernes, par une nouvelle campagne des Mines de Potasse d'Alsace vers 1950 (Fig. 4). Puis ce fut le tour de campagnes de sismique-réflexion fort nombreuses, exécutées chronologiquement par des sociétés française, allemande et américaine. Des prospections de sismique-réfraction, telluriques et électriques et même aéromagnétométriques sont enfin venues compléter nos renseignements tectoniques et gîtologiques.

Parallèlement, les techniques de sondage s'amélioraient; en 1936 les premiers appareils de forage Rotary furent mis en œuvre.

L'huile profonde du champ de Pechelbronn fut rencontrée en 1922 dans les calcaires oolithiques du Dogger et en 1932 dans les grès à roseaux du Keuper à Ohlungen (Fig. 7), en 1935 dans la



FIGURE 15

Galerie principale du Siège Le Bel au niveau le plus profond (vers 400 m) : puisard et pompe à air comprimé aspirant le pétrole d'un réservoir lenticulaire sous-jacent, en janvier 1963. Un siècle sépare la Fig. 15 de la Fig. 12

At the deepest Pechelbronn mining gallery where oil is sucked up by compressed air

Lettenkohle à Kutzenhausen, puis en 1947 à Soultz, en 1949 enfin dans le Muschelkalk également à Soultz-sous-Forêts. Ces deux derniers sondages étaient d'ailleurs éruptifs.

En s'associant en 1948/49 au Bureau de Recherches de Pétrole, le champ d'activité de la SAEM Pechelbronn s'étendit hors de sa concession, essentiellement au Bas-Rhin. C'est ainsi que le champ de Schirrhein fut découvert et ceux de Soufflenheim et de Soultz furent mieux prospectés.

Pour ce qui est de la concession de Pechelbronn, les 2 900 nouveaux sondages et 600 pompes en activité entre 1918 et 1964 ont finalement produit 1 407 977 t d'huile brute.

L'Entre-deux-guerres a donc été la période faste pour cette grande industrie locale qui animait tout le nord de l'Alsace, à la fois sous terre et en surface (Fig. 13 et 14). Mais les réserves d'huile s'épuisaient rapidement et bientôt, n'obéissant plus aux critères de la rentabilité moderne, Pechelbronn passa dans la glorieuse légende en 1964.

3.2. LA SOCIÉTÉ DE PROSPECTION ET EXPLOITATIONS PÉTROLIÈRES EN ALSACE : PREPA

Conçue par une association de la SAEM Pechelbronn avec le Bureau de Recherches de Pétrole (BRP) en 1948, la PREPA est née en 1953. Son activité de forage autonome a débuté en 1954 et s'est étendue à toute l'Alsace, à tous les niveaux stratigraphiques, et d'abord au Haut-Rhin. Désormais les campagnes de reconnaissance géophysique devenaient indispensables pour préciser les structures de l'ensemble du sous-sol alsacien.

Entre 1952 et 1957, les champs de Staffelfelden, Reiningue et Bollwiller furent découverts dans le Haut-Rhin, tous dans le Jurassique et totalisant une production de 74 335 t d'huile (Fig. 14).

Dans le Bas-Rhin, l'exploitation des champs de Schirrhein et de Soufflenheim-Donau fut poursuivie et l'on découvrit entre 1955 et 1962 les champs de Scheibenhard, Oberseebach, Oberlauterbach et Kaltenhouse dans le Tertiaire, celui d'Eschau à la fois dans le Tertiaire et le Jurassique, ceux de Haguenau et Meistratzheim dans le Jurassique exclusivement (BLUMENROEDER, 1962). Au total, 358 378 t d'huile ont été alors produites. Signalons aussi le champ de gaz à 82 % de méthane découvert en 1955 à Schaeffersheim et celui à 98 % de méthane découvert en 1958 à Schaffhouse-près-Seltz.

En 1962, les travaux de forage de la PREPA se sont arrêtés totalisant 161 sondages profonds dont 89 dans les différents champs (16 dans le Haut-Rhin, 73 dans le Bas-Rhin). Les sondages d'exploration hors champs, non productifs, étaient de 32 dans le Haut-Rhin et de 40 dans le Bas-Rhin. L'exploitation elle-même a été arrêtée et les puits rebouchés en 1968 (Fig. 14).

Par la suite, d'*autres compagnies pétrolières* se sont intéressées au pétrole alsacien en prospectant et en implantant des sondages. D'abord la CEP, héritière de la PREPA, puis la FRANCAREP en 1964 (Heimersdorf 1) et l'EURAFREP en 1967 (Morschwiller 3, Spechbach 1). Suit une décennie d'arrêt pratiquement total des recherches, si l'on excepte le reforage du gisement de gaz dans le Dogger à Schaeffersheim par Elf-ERAP en 1971 et le sondage de Meistratzheim 2 en 1974 par Shell qui atteint le granite du socle à 1 666,5 m. La Société GEOREX, nouvelle venue, d'origine locale par ses fondateurs et ses premières interventions, s'intéressait seulement au Haut-Rhin : le sondage implanté à Burnhaupt en 1970/71 traversait le Rauracien jusqu'à 1 483 m et celui de Michelbach en 1971 la Grande Oolithe jusqu'à 1 059 m, les deux niveaux s'avérant improductifs.

3.3. LES MINES D'ASPHALTE DE LOBSANN

A 4 km au nord de Merkwiller-Pechelbronn, près du village de Lobsann, on exploitait souterrainement depuis 1788 des lignites, puis en 1820 des sables bitumineux dont on faisait du mastic. La découverte de calcaires asphaltiques en 1838 conduisit à une exploitation plus méthodique, conduite alors par une Société par actions. Celle-ci devait souvent changer de raison sociale, entre autres : Dournay, Latil et Cie jusqu'en 1873, la Lobsann-Asphalt Maatschappij avec siège à Amsterdam jusqu'en 1918, puis la Société strasbourgeoise des asphaltes et bitumes qui présida à la fermeture de ces mines en 1950.

En bordure de la faille rhénane qui longe le Massif du Hochwald, à l'extrémité septentrionale du champ de Pechelbronn, une dizaine de kilomètres de galeries souterraines superposées ont servi à l'extraction par dépilage de *calcaires plus ou moins imprégnés d'asphalte* (Fig. 8). L'exploitation, à une profondeur moyenne de 50 m, se situait dans un complexe marno-calcaire, épais de 1 à 26 m, surmontant les faciès sableux et conglomératiques des Couches de Pechelbronn supérieures (HAAS & HOFFMANN, 1928). Le calcaire se présente sous une grande variété de faciès, quant à sa

structure, sa composition et sa coloration. On a dénombré 5 couches ou zones imprégnées de façon très irrégulière, leur épaisseur variant entre 1,5 et 8 m. La teneur en bitume ne dépasse guère 12 %, exceptionnellement elle atteint 18 %. L'asphalte fait corps avec le grain du calcaire, et ceci au voisinage de calcaires totalement stériles, mais il remplit aussi des fissures.

L'imprégnation augmente en direction NW où les calcaires plus francs viennent buter contre la faille rhénane et le grès des Vosges du Trias. Ces calcaires d'eau douce qui renferment des bancs de lignite sont affectés par de nombreuses failles de faible rejet et à regard E; elles n'ont aucun rapport avec la présence ou la concentration de bitume.

Il s'agit donc d'une petite étendue de dépôts lacustres avec une riche flore et faune fossiles : zone stratotype et mammalogique de Lobsann, correspondant au niveau de Ronzon dans le Massif Central, d'âge oligocène inférieur. L'alternance de phases lacustres et de phases palustres était troublée par des arrivées détritiques sporadiques à partir de la bordure et par des relations temporaires avec le bras de mer dessalé du fossé rhénan (SITTLER, 1982).

La roche extraite n'était pas homogène. La production aussi était variable, mais pouvait atteindre 10 000 à 12 000 t/an de roches asphaltiques que l'on concassait, broyait et pulvérisait. Puis on ajustait la teneur en asphalte à environ 10 % ou davantage selon les produits fabriqués : asphalte comprimé pour le revêtement des chaussées, carreaux asphaltiques pour le dallage, et les fameux pains de mastic moulés de 25 kg marqués au sceau de Lobsann, pour tous les travaux d'étanchéification.

3.4. HIRTZBACH ET LE PÉTROLE DE HAUTE ALSACE

Dans le Sundgau, autour de la localité de *Hirtzbach*, des sables pétrolifères sont à l'origine de suintements d'huile, connus dans la vallée de l'Oelbach dès le 15[e] siècle. On a cherché à exploiter cette huile dès 1782 comme à Pechelbronn, bien que le gisement soit ici d'un âge différent, un peu plus récent, dans les Couches à Mélettes de la Série grise du Rupélien marin. Malgré trois périodes de recherches et de sondages en 1928, 1935 et 1954, animées d'ailleurs par la SAEM Pechelbronn, la région de Hirtzbach n'a pas connu le succès pétrolier (VONDERSCHMITT, 1942; BLUMENROEDER, 1954; SITTLER, 1972). Qu'il s'agisse de l'huile du Tertiaire ou des indices rencontrés dans le Jurassique et le Trias, les hydrocarbures semblent altérés et trop lourds pour être extraits. En effet, la région de Hirtzbach se trouve sur la bordure ouest, très faillée, du horst de Mulhouse où les circulations d'eaux météoriques sont évidentes (Fig. 16).

Dans le champ de fractures de *Lauw-Sentheim* des indices de bitumes sont connus dans le Jurassique. Trois forages y ont été implantés en 1941 et 1942 par la SAEM Pechelbronn sous contrôle de la Deutsche Erdöl A.-G. Traversant la série tertiaire jusqu'au Rauracien, ils ne rencontraient que des traces d'huile.

Après 150 ans de recherches dans le Haut-Rhin, aucun champ pétrolifère exploitable n'avait donc pu être mis en évidence, quand soudainement le 9 novembre 1951 le pétrole jaillit au sondage *Staffelfelden DP 25* foré par les Mines domaniales de potasse d'Alsace. Ce fut l'origine du premier et plus important champ de Haute Alsace. Le réservoir dans les calcaires oolithiques du Dogger, vers 1 900 m, à une température de 96°C et avec une pression de 203 kg, débitait une huile très fluide (Fig. 17). Pour des raisons de sécurité, ce sondage fut rebouché avant que le champ ne soit exploité les années suivantes (MAÏKOVSKY, 1952).

Commence alors une prospection systématique de tout le Haut-Rhin par la Société PREPA, comme cela est dit plus haut, pour ne mettre en évidence finalement que trois modestes champs pétrolifères à la suite de 48 sondages profonds, dont 39 à plus de 1 000 m de profondeur, avec le record de 2 533 m à Blodelsheim. *Importante constatation pour le Haut-Rhin, aucun sondage n'a été productif dans le Tertiaire.*

3.5. LES TRAVAUX DE LA DERNIÈRE DÉCENNIE : 1974-1984

Au lendemain du « premier choc pétrolier » international, on se souvient à nouveau de l'Alsace et, après une quinzaine d'années d'arrêt de forage, les prospections reprennent en 1978 et 1979 au sud de Strasbourg par des sondages épars dans de nouveaux secteurs. De grands groupes pétroliers s'intéressent maintenant au berceau de l'industrie pétrolière française : Shell, Elf-SNEA(P), seuls ou bien en association avec d'autres compagnies, telle GEOREX.

Les sondages cherchent partout à *tester le réservoir de la Grande Oolithe* qui avait été produc-

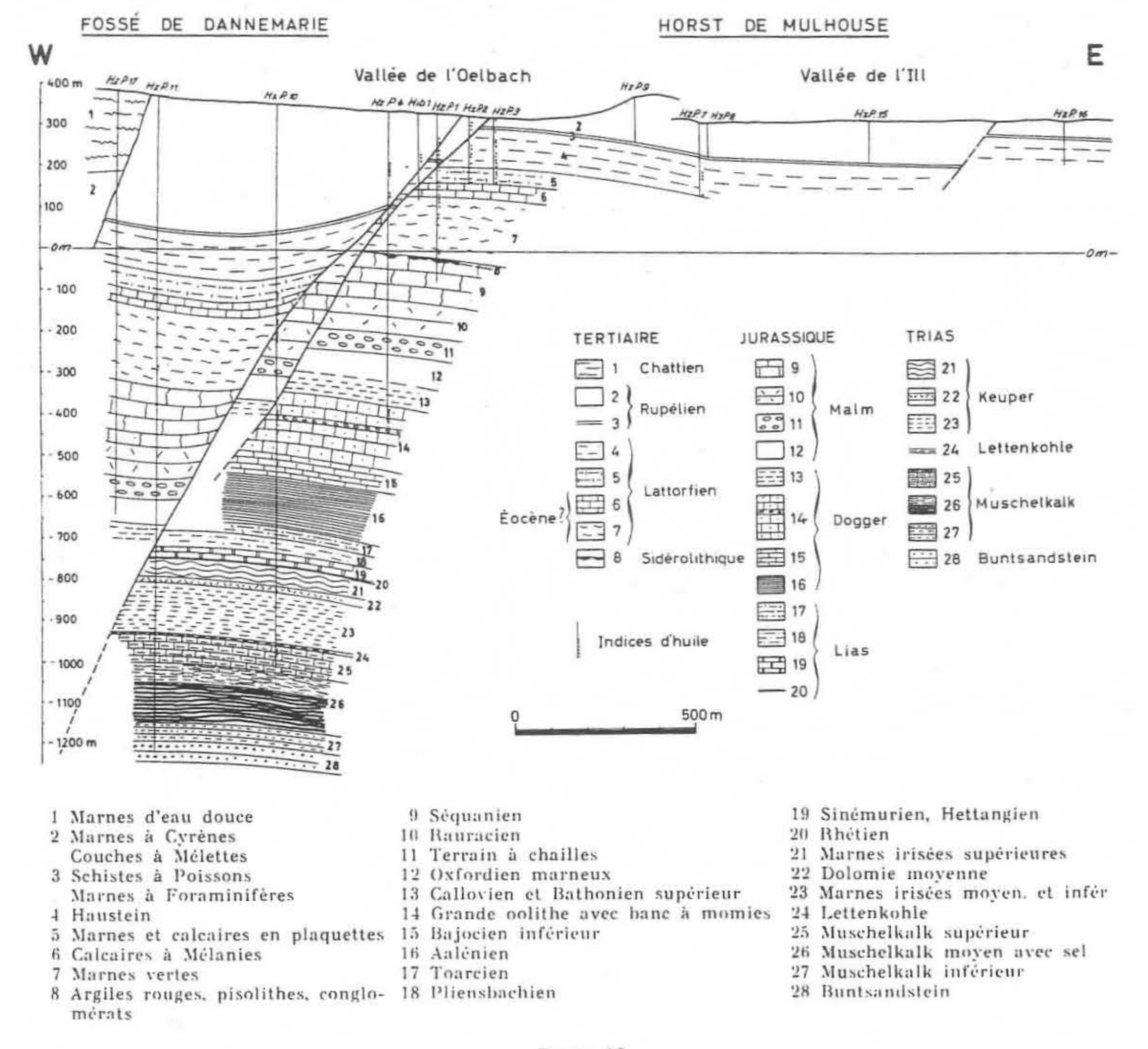


FIGURE 16

Coupe géologique de la région pétrolifère de Hirtzbach sur la bordure sud-ouest du horst de Mulhouse (d'après Pechelbronn SAEM, modifié)

Geological cross section in the southernmost part of the graben, on the western side of the Mulhouse horst, where oil seepages occur in the Hirtzbach area

tif d'huile sans être riche, mais aussi productif de gaz combustibles. La chance ne devait pas sourire à cette entreprise et 7 sondages à des profondeurs, généralement voisines de 2 000 m restaient « secs » : en 1978 Muntzenheim et Feldkirch, en 1979 Artzenheim, Grunsbuhl et Binnenweg 1 et 1 bis, en 1980 Mackenheim. Un résultat géologique intéressant était la rencontre du socle granitique à Muntzenheim à 1 837 m de profondeur.

Une deuxième vague de travaux se situe entre 1980 et 1983 ; elle se consacre à la *reprise des prospections dans les champs abandonnés* en 1968, ou avant, par la PREPA et la SAEM Pechelbronn. Le groupe Total-CFP apparaît maintenant en Alsace. On réactive les champs de Staffelfelden, Ohlungen, Pechelbronn, Bollwiller, Scheibenhard, Oberlauterbach et Eschau. Si la réussite est loin d'être évidente dans les terrains mésozoïques,

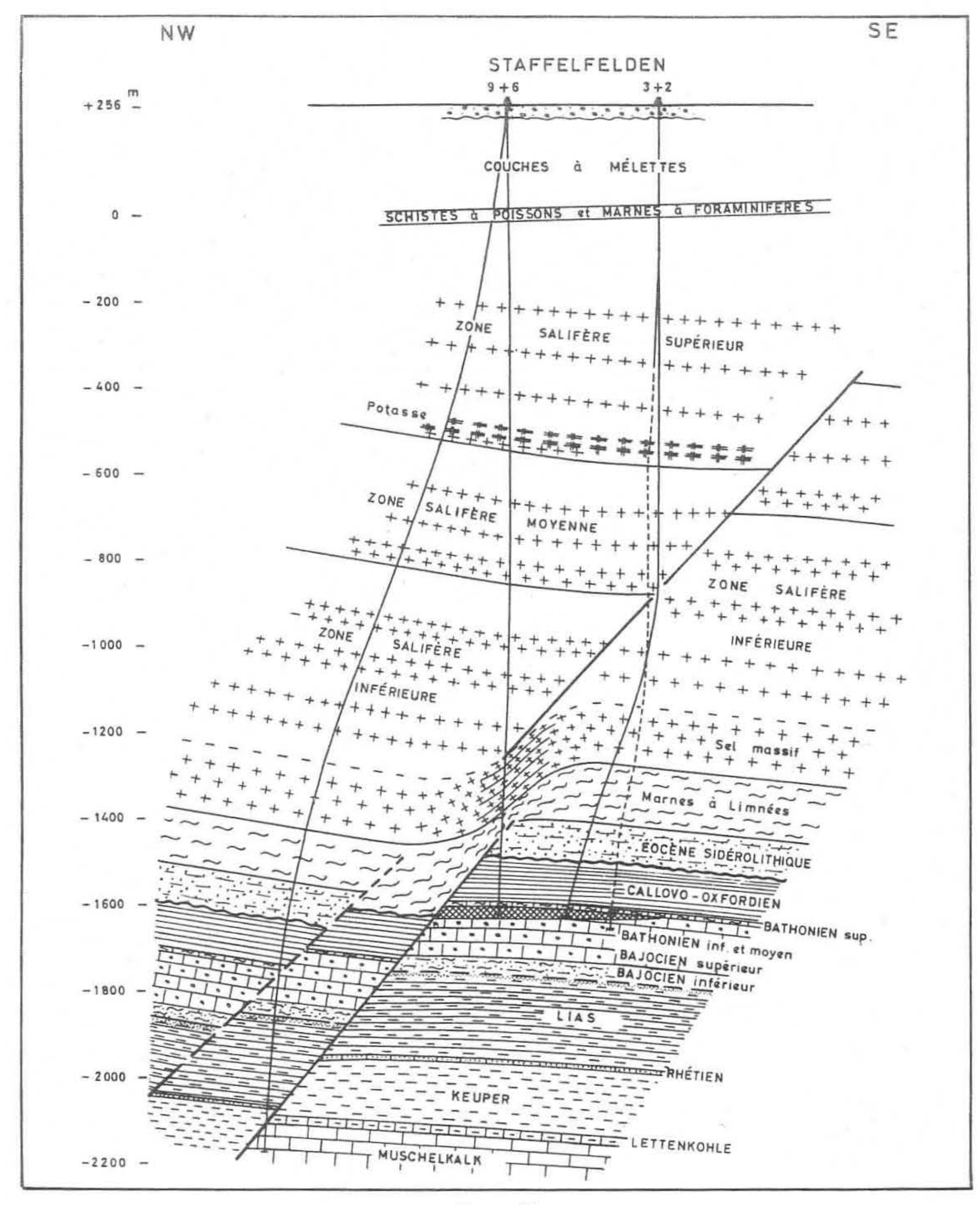


FIGURE 17

Coupe structurale du champ de Staffelfelden. Sous les séries salifères tertiaires du fossé méridional, la Grande Oolithe du Dogger est productive (d'après BLUMENROEDER, 1962, modifié)

The Staffelfelden oil field in the southern part of the rift. Below the saliferous Tertiary, the Dogger limestone is the oil-producing horizon

en revanche les réservoirs tertiaires sont à nouveau productifs (Tabl. III); c'est le cas en particulier du deuxième champ alsacien : Scheibenhard-Niederlauterbach. Le nord de l'Alsace s'anime donc à nouveau, même si quelques puits, à Hitzeln, Neewiller, Walbourg, Lobsann, Lampertsloch, Preuschdorf, Rohrlach, Bruderhaus sont restés improductifs.

Trois faits positifs marquent le *nouveau souffle de l'Alsace pétrolière* : la découverte du champ du Schelmenberg dans les niveaux tertiaires classiques, l'intéressant champ de gaz qui se développe à Schaeffersheim-Erstein dans le Dogger, l'unité pilote de récupération assistée d'huiles lourdes à Marienbronn.

4. — LES CHAMPS PÉTROLIFÈRES D'ALSACE

4.1. LE CHAMP DE PECHELBRONN ET D'OHLUNGEN

Zone marginale élevée du fossé, allongée sur plus de 20 km le long de la faille rhénane (Fig. 7, 8 et 11), le périclinal de Pechelbronn est encore limité au nord et au sud par des dépressions tectoniques que reflète en partie la topographie (Schnaebele, 1948). C'est aussi la zone à géothermie la plus élevée d'Alsace. L'activité minière et de forage a surtout intéressé les niveaux inférieurs du Tertiaire, Couches de Pechelbronn et Zone dolomitique, épais de 800 m (Tabl. I). Les réservoirs sont des lentilles sableuses, allongées en direction rhénane N 20 sur quelques centaines de mètres au maximum, et épaisses de 2 à 3 m en moyenne (Fig. 2). Les horizons gréseux continus sont rares (Glaswinkel). Entre 1735 et 1964, date de rebouchage des puits de mines et des derniers sondages, une surface de 1 250 ha a été minée de 425 km de galeries. 5 550 sondages ont été forés à une profondeur moyenne de 400 m, parmi lesquels 2 700 ont été productifs et équipés de pompes à balanciers. L'essentiel, soit 97 % de l'huile, a été produit dans les terrains tertiaires, alors que les réservoirs du Mésozoïque étaient variés et tous modestes. Au total, la quantité remarquable de 3 314 051 t d'hydrocarbures a été extraite, dont les deux tiers par sondages. Grâce aux drainages miniers, le cœfficient de récupération de l'huile atteignait 55 % : 15 % par forage et 40 % par puits et galeries, parfois davantage en cas de bonne perméabilité du réservoir (Fig. 15).

Signalons que 4 raffineries ont été construites au voisinage de ce champ, à Soultz, Biblisheim, Durrenbach et Merkwiller, dernière à disparaître en 1970.

En 1981, le Groupe Total a repris la concession et implanté depuis lors 12 forages, indépendamment du secteur-pilote de Marienbronn. Tous traversent les Couches de Pechelbronn non productives; la Grande Oolithe à Ohlungen et le Grès à roseaux au lieu-dit Rohrlach sont aussi stériles. Seul un groupe de 4 sondages, dont 3 forés en déviation en 1983, forme le petit champ productif de Hoelschloch, en bordure SW de Merkwiller. L'huile du Grès à roseaux du Keuper, atteint à 753 m, y est pompée à un débit n'atteignant plus que 6 m^3/jour en 1984.

4.2. LE CHAMP DE SCHIRRHEIN

C'est, en 1954, le premier champ du Bas-Rhin en dehors de la concession de Pechelbronn, avec 13 sondages dont 5 ont été productifs (2 momentanément) entre 525 et 555 m dans les grès de Glaswinkel, à la base des Couches de Pechelbronn supérieures (Fig. 7). L'exploration du Mésozoïque par 4 forages, dont 1 jusqu'au Muschelkalk à 1 770 m n'a donné aucun résultat. L'alignement des puits, selon une étroite bande de près de 2 km, suit une structure classique de piège faillé. Une production faible mais régulière jusqu'en 1968 ne cumulait que 11 912 t d'huile anhydre très visqueuse.

4.3. LE CHAMP DE SOUFFLENHEIM-DONAU

Dès la Seconde Guerre mondiale, Pechelbronn SAEM y avait implanté une vingtaine de sondages, puis 8 autres au lendemain des hostilités, allant jusqu'au Jurassique, au Muschelkalk et au Buntsandstein (Fig. 7). A partir de 1955, la PREPA ajoutait 19 forages Donau supplémentaires. Mais le seul horizon productif dans 13 puits est le grès de la Zone de Glaswinkel; vers 500 m de profondeur, un demi-dôme piégé par une faille normale est encore recoupé par une faille inverse. 63 316 t d'huile anhydre, très visqueuse, ont été cumulées entre 1954 et 1968 (Sittler, 1974*b*).

4.4. LE CHAMP DE SCHEIBENHARD-NIEDERLAUTERBACH

Au sud de la frontière du Palatinat, la PREPA a découvert en 1956 *le champ le plus important d'Alsace*, après celui de Pechelbronn. La structure

est conforme aux pièges classiques faillés et culmine en territoire français (COSTE, 1959; BLUMENROEDER, 1962). Sur les 30 sondages implantés, 19 ont été productifs dans deux niveaux : la base gréseuse des Couches à Mélettes entre 550 et 825 m selon la disposition structurale, et les grès (Glaswinkel/Beinheim) de la base du Pechelbronn supérieur entre 885 et 970 m de profondeur (Fig. 18). La production équilibrée entre les deux réservoirs indique cependant une plus grande richesse pour le niveau profond où l'huile est moins visqueuse, tout en étant aussi paraffinique que dans le niveau supérieur. Le régime de production hydrodynamique est doublé ici de l'expansion du gaz. Au moment de l'abandon du champ, en 1968, on avait produit 221 469 t d'huile, soit plus de la moitié produite alors en Alsace, hors Pechelbronn. Le sondage Scb.102 est le plus profond de Basse Alsace avec 2 294,5 m dans le Buntsandstein déjà atteint à 2 199 m.

TABLEAU III
Champs pétrolifères et sondages productifs en Alsace
Oil fields and productive wells in Alsace

Localités	Dates d'exploitation	Nombre de sondages	Réservoir producteur	Profondeur du réservoir en m	Production en tonnes
Pechelbronn (mines et sondages) Ohlungen Ohlungen, Kutzenhausen, Soultz	1735-1964 1922-1964 1932, 1935, 1949	5 550	Eocène sup.-Oligocène (z. dolomit. -c. Pechelbronn) Dogger : Grande Oolithe Keuper, Muschelkalk	mines : 150 - 400 sondages : 500 - 800 500 - 1 200	3 213 151 100 900
Schirrhein	1954-1968	13 4	Oligocène : z. Glaswinkel Trias	525 - 550	11 912
Soufflenheim-Donau	(1941) 1954-1968	47	Oligocène : z. Glaswinkel	550	63 316
Scheibenhard Niederlauterbach	1956-1968 1983→	30 10	Oligocène : c. Mélettes Oligocène : z. Glaswinkel - idem -	550 - 825 885-970 400 - 1 400	221 469 (1 700 t/mois)
Oberlauterbach	1962-1964 1983→	2 2	Oligocène : c. Mélettes Oligocène : c. Pechelbr. moy.	574 - 591 1 050	301 (15 t/mois) + gaz
Schelmenberg	1982→	4	Oligocène : c. Mélettes Oligocène : z. Glaswinkel	500 975	(700 t/mois)
Eschau	1955-1968 1984-1985→	4 14 1	Oligocène : c. Niederroedern Dogger : Grande Oolithe Dogger : Grande Oolithe	350 862 - 913 862 - 913	220 60 181 (150 t/mois)
Schaeffersheim-Erstein	1955-1983	5	Dogger : Grande Oolithe	792 - 874	gaz
Bollwiller	1957-1963 1982	1 1	Dogger : Grande Oolithe Dogger : Grande Oolithe	1 760 - 1 818 1 850	695 –
Staffelfelden	1951-1963 1980	9 2	Dogger : Grande Oolithe Dogger : Grande Oolithe	1 890 - 1 920 1 890 - 1 920	55 476 –
Reiningue	1955-1968	6	Jurassique sup. Rauracien	1 400	18 165
Marienbronn-Lampertsloch	1981-1985	19	Oligocène : c. Pechelbr. sup.	250 - 270	essais de récupération assistée
Autres sondages productifs					
Haguenau-Sud	1955-1956	3	Dogger : Grande Oolithe	1 430 - 1 456	152
Oberseebach	1960-1961	2	Oligocène : c. Pechelbr. sup.	979 - 1 022	955
Kaltenhouse 1	1962	1	Oligocène : z. Glaswinkel	654 - 692	236
Meistratzheim 1	1962 (1974)	1 (+1)	Dogger : Grande Oolithe	637-664	(gaz+5)
Niederroedern-Nord 1	1982	1	Oligocène : c. Mélettes	600	(huile+gaz)
Salmbach 1	1982	1	Oligocène : c. Mélettes	850	(huile)
Hoelschloch-Merkwiller	1983→	4	Keuper : grès à roseaux	753 - 778	(100 t/mois)

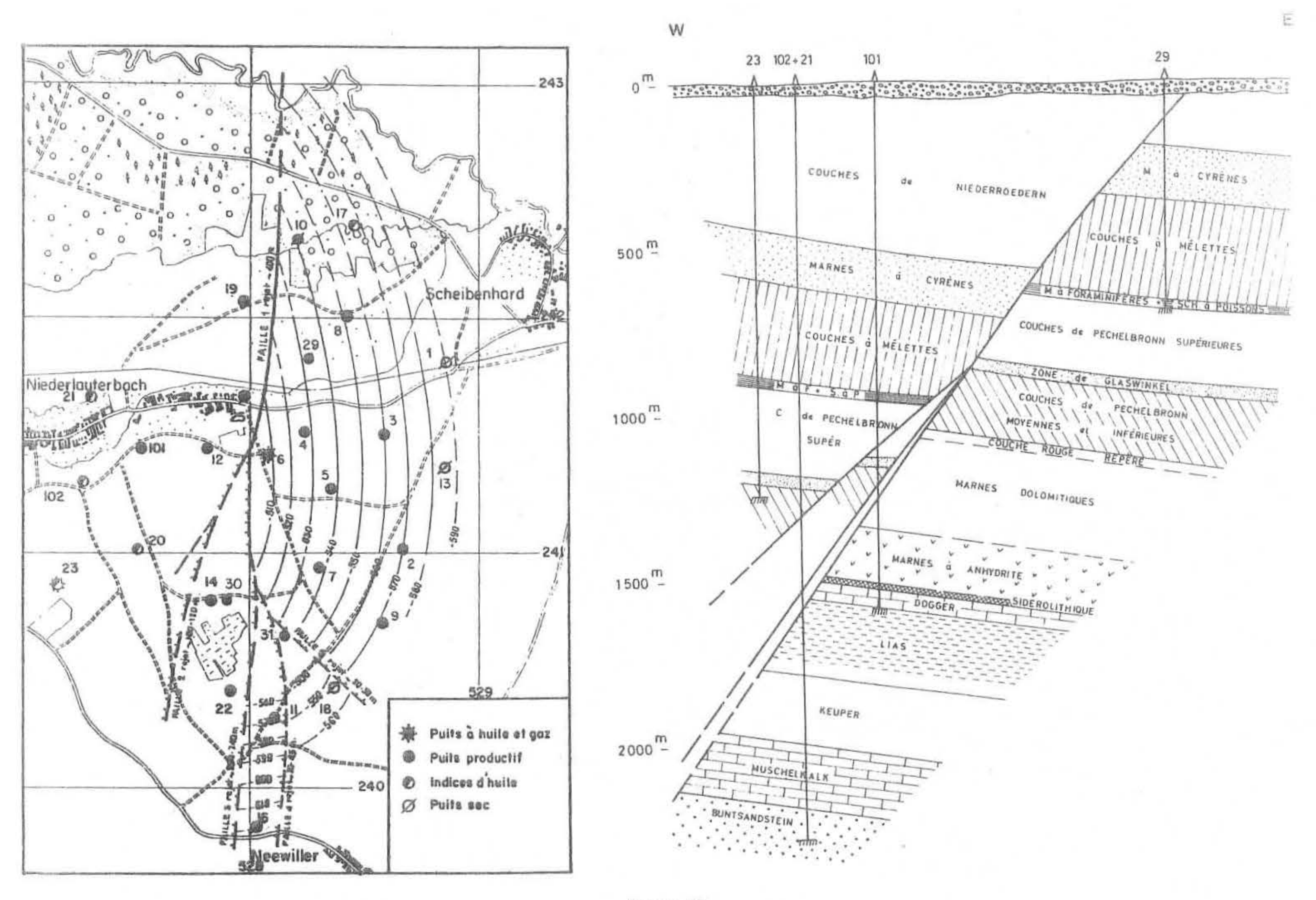


FIGURE 18

Le champ pétrolifère actuellement le plus important d'Alsace : Scheibenhard-Niederlauterbach. Situation, carte tectonique au toit des Couches de Pechelbronn, et coupe géologique détaillée (d'après des documents PREPA)

The Scheibenhard-Niederlauterbach oil field. Structural sketch on the top of the Pechelbronn beds, oil and gas producing wells (black points)

Après 15 ans de répit, la SNEA(P) associée avec Cluff Oil reprend à son compte le même champ en forant, sous l'appellation Niederlauterbach, 4 sondages en 1983 et 6 en 1984. Profonds de 700 à 1 400 m, ils ont rencontré les deux horizons productifs dont on cumule d'ailleurs les huiles. Les 5 premiers sondages mis en production totalisent déjà 100 m^3/jour. Deux autres sondages : Salmbach en 1982, ayant donné lieu à une petite production, et Muenzfeld (lieu-dit) en 1984, encadrent le champ à l'ouest et au sud.

4.5. LE CHAMP D'OBERLAUTERBACH

En 1962, deux des derniers sondages de la PREPA découvraient une structure effondrée productive dans les Couches à Mélettes vers 574-591 m. L'un des sondages a fourni 301 t d'huile jusqu'en 1964.

Vingt ans plus tard, en 1983, la SNEA(P) et Cluff Oil forent Obl. 1 bis, productif d'huile lourde comme Obl. 1 et 2. Le sondage Obl. 3 atteint 1 395 m et met en évidence un réservoir faiblement producteur de gaz dans le Pechelbronn moyen à 1 050 m.

4.6. LE CHAMP DU SCHELMENBERG

La colline située au sud-ouest de Wintzenbach et à l'est d'Eberbach-Seltz recèle un nouveau champ découvert par la SNEA(P) en 1982. Deux sondages sur trois implantés là sont productifs dans les Couches à Mélettes surtout, vers 500 m, et dans les grès de Glaswinkel vers 975 m. La production est stabilisée autour de 20 m^3/jour (2 928 t en 1983). En 1984, un sondage Slm.4 est réalisé, en association avec Cluff Oil (Tabl. III).

4.7. LE CHAMP D'ESCHAU

Ce champ de Moyenne Alsace, découvert par la PREPA en 1955, a un caractère d'originalité. Pour la première fois, on rencontrait de l'huile dans les horizons gréseux des Couches de Niederroedern vers 350 m de profondeur, mais l'événement fut sans lendemain.

En 1957, on rencontrait aussi pour la première fois dans cette région le calcaire de la Grande Oolithe du Dogger imprégné d'huile. C'est cette structure du Jurassique, confinée à une étroite bande le long de la faille, qui a été traversée par 14 sondages dont 7 productifs entre 862 et 913 m de profondeur. La production, voisine de celle de Soufflenheim, a atteint 60 181 t d'huile aux caractéristiques voisines de celles du Tertiaire.

En 1983, quinze ans après l'abandon du champ, la SNEA(P) reprend les travaux sur 3 anciens puits producteurs, complétés par un puits injecteur. L'huile produite est malheureusement mélangée à beaucoup d'eau (1 418 t d'huile anhydre en 1983). Mais on ne désarme pas, en 1984 un nouveau sondage Esc. 12 met en œuvre le procédé de forage multidrains pour tester plus économiquement le réservoir : c'est une « première alsacienne ».

4.8. LE CHAMP DE SCHAEFFERSHEIM-ERSTEIN

La Société PREPA avait découvert en 1955 une structure productive de gaz dans la Grande Oolithe à 799 m. En 1971, la SNEA(P) exploitait par un deuxième sondage Schs. 2 ce gisement à gaz toujours productif entre 792 et 874 m (2 523 570 m^3 en 1983). En 1979, deux sondages au lieu-dit Binnenweg et un autre au lieu-dit Grunsbuhl n'ont plus rencontré d'indices dans la Grande Oolithe. Au contraire, le sondage Erstein 3, en 1983, a trouvé le réservoir productif de gaz à 840 m.

4.9. LE CHAMP DE BOLLWILLER

Un seul sondage a traversé, en 1957, une petite structure classique faillée avec réservoir dans la Grande Oolithe entre 1 760 et 1 818 m. L'éruption d'huile ne présageait alors pas une production aussi modeste que 695 t d'huile anhydre recueillie de 1958 à 1963.

La Société Shell, associée à GEOREX, a repris en 1982 la prospection de ce champ en y forant, en déviation contrôlée, Bol. 2 jusqu'à 2 089 m (profondeur verticale 1 850,2 m) ; la Grande Oolithe rencontrée à 2 050 m (1 822 m) était stérile.

4.10. LE CHAMP DE STAFFELFELDEN

Mis en exploitation en 1952 par 2 sondages, ce champ fut développé par 7 autres puits entre 1953 et 1955 pour atteindre aussi la Grande Oolithe, dolomitisée et fissurée (Fig. 17). Le réservoir, circonscrit sur 0,7 km^2, forme un demi-dôme piégé par une faille inclinée vers l'ouest, à une profondeur de 1 890 à 1 920 m. Les 6 puits producteurs avaient cumulé 55 476 t d'huile anhydre extrêmement fluide en 1963, à l'arrêt de l'exploitation.

En 1980 seulement, Shell a repris les recherches dans ce champ en y forant Staffelfelden 101 et 101 bis. Ces puits déviés et dirigés, afin d'éviter la couche de potasse, ont rencontré à plus de 2 300 m une Grande Oolithe calcaire et compacte, beaucoup trop faiblement productive pour être exploitée.

4.11. LE CHAMP DE REININGUE

Ce champ fait exception par sa structure en dôme non faillé, découverte en 1955. Il s'agit d'un bombement de calcaires du Rauracien situés vers 1 400 m de profondeur, ancien haut-fond altéré et cimenté par une couverture tertiaire. Les indices encourageants dans la Grande Oolithe n'ont rien produit. Sur les 6 sondages dont 1 dévié, 3 seulement ont fourni 18 165 t d'huile anhydre jusqu'en 1968 : ce champ était l'avant-dernier d'Alsace a être bouché.

4.12. LE CHAMP DE MARIENBRONN : UNE UNITÉ PILOTE DE RÉCUPÉRATION ASSISTÉE

Sur ce gisement, seules les huiles légères avaient été exploitées quand Total-CFP décida, en 1981, de s'attaquer aux 470 000 t de réserve d'huile lourde prisonnière des grès de la base du Pechelbronn supérieur, vers 250-270 m de profondeur, en raison de sa densité (11° API) et de son extrême viscosité (227 centipoises) C'est un projet pilote destiné à maîtriser la technique de l'injection de vapeur à 280°C et 70 bars de pression; il exploite une réserve de 250 000 t d'huile sur 9 ha environ, par 19 puits forés avec un maillage carré de 125 m de côté. Ces puits servent alternativement à l'injection de vapeur (1 mois) pour réchauffer l'huile et la rendre plus fluide, puis à la récupération du pétrole brut par pompage (3 mois). Deux forages supplémentaires profonds servent à la réinjection des effluents usés. Après avoir résolu de nombreux problèmes techniques, cette unité fonctionne en 1984 pour produire pendant 4 ans 15 à 20 000 t par an, dont 40 % servent de combustible pour la production de vapeur. En fin d'exploitation, un balayage à la vapeur par injection continue dans les puits centraux et production par les puits périphériques est prévu (Total Information, 88, 1981 ; COMBAZ, 1983).

L'huile ainsi produite, mélangée à un brut léger, peut être raffinée ; mais, expérimentation oblige, elle subit un traitement préalable sur la plate-forme expérimentale de valorisation des huiles lourdes (ASVAHL) à Solaize, près de Lyon.

Si cette technique de récupération atteint un seuil de rentabilité, d'autres gisements alsaciens d'huiles lourdes sont d'ores et déjà à sa disposition dans le secteur de Pechelbronn, à plusieurs niveaux de l'Eocène [1].

5. — BILAN ET CONCLUSION

Les enseignements que l'on peut tirer de ce qui précède, quant à la genèse et à la conservation du pétrole dans le fossé rhénan, sont de plusieurs ordres. Les conditions de dépôt de la matière organique, de sa maturation, de sa migration ou de son accumulation sont ici beaucoup plus complexes que dans la plupart des autres bassins sédimentaires. D'une région à l'autre du graben, l'évolution tectonique et sédimentaire surtout est différente dans un même espace-temps.

1) Les *deux types d'huile géochimiquement différents* indiquent clairement que nous sommes en présence de deux séries de roches mères. La subdivision en huiles du Trias d'une part et du Jurassique-Tertiaire d'autre part n'est pas satisfaisante. L'analyse actuelle montre que la coupure se place plutôt au-dessus de l'Eocène moyen continental, séparant ainsi *des huiles pré-rift et des huiles syn-rift*. La simplicité de l'hypothèse proposée repose déjà sur quelques faits; elle ne doit pas nous cacher, cependant, la nécessité d'un plus grand nombre d'études géochimiques de roches mères pour clarifier les filiations avec les huiles.

2) L'excellente connaissance du remplissage sédimentaire du rift, acquise d'abord par les travaux miniers à Pechelbronn et dans le bassin potassique de Mulhouse, puis grâce aux sondages pétroliers, aux campagnes géophysiques et aux études géothermiques, nous permet de *réfuter l'idée d'une maturation insuffisante des roches tertiaires,* pour générer leur propre huile.

3) Face au grand nombre de roches mères mésozoïques et tertiaires, assuré de leur bonne catagenèse conduisant même au gaz à l'extrémité septentrionale du graben, il fallait expliquer l'importance relativement faible des réservoirs. Beaucoup plus que par le passé, il nous faut aujourd'hui *admettre les dismigrations et dégradations*

(1) En raison du manque d'étanchéité du réservoir exploité, l'unité pilote sera arrêtée fin 1985.

d'huiles. La destruction la plus spectaculaire, et la plus certaine en Alsace, s'est opérée par l'oxydation ou la contamination bactérienne à partir de la surface. Et ceci aussi bien aux périodes d'émersion pré-rift et syn-rift que de nos jours, où les mouvements de distension ouvrent et favorisent le rejeu multiple de nombreuses failles.

4) L'analyse tectonique a montré qu'il fallait distinguer les grandes failles limites de structures relativement mobiles et les *failles scellées par la pression latérale qui conduisent à un piégeage efficace*. Mais dans ce domaine, l'exploration pétrolière rencontre une de ses difficultés majeures, liée au destin constamment perturbé du rift rhénan et dont la mobilité est aujourd'hui plus importante que celle enregistrée en moyenne au Tertiaire.

5) Le fait tectonique a aussi considérablement réduit la taille et l'homogénéité des corps sédimentaires, susceptibles de former de bons magasins d'hydrocarbures. Ainsi, la reconstitution de l'évolution sédimentologique détaillée des grès du Tertiaire, les plus riches en huile, rencontre encore beaucoup d'obstacles. Mais dès à présent, on peut interpréter de nombreux champs pétrolifères comme d'anciennes aires de type deltaïque, qu'elles soient en bordure du graben, ou actuellement un peu plus au centre; leur structure en éventail est souvent caractéristique.

Toutes ces considérations nouvelles ou prospectives, replacées dans le cadre taphrogénétique régional, sont susceptibles d'*expliquer la différence de production d'huile entre Haute et Basse Alsace*. Qu'il s'agisse des anciens champs exploités jusqu'aux années 60, et dont nous avons dressé le bilan, ou bien des recherches de la dernière décennie, le Bas-Rhin reste largement en tête par le nombre de sondages, de mètres forés et de découvertes productives en huile et en gaz. Les chiffres indiquent que la Basse Alsace a produit 6 fois plus d'hydrocarbures que la Haute Alsace depuis l'après-guerre et ce rapport est exactement de 50 fois plus, si l'on remonte à l'origine des productions, l'écart s'accentuant encore tous les jours en 1985.

Si le rôle pétrolier de l'Alsace reste modeste sur le plan économique, cette province occupe au contraire une place de choix dans l'histoire de l'industrie pétrolière de l'Europe : berceau et creuset, elle l'a été par le savoir-faire des entrepreneurs et les techniques d'avant-garde qu'ils y ont mises au point. C'est encore aujourd'hui un « laboratoire d'essai », accessible en grandeur nature.

6. — RÉFÉRENCES

Anonyme (1981). — Marienbronn, le réveil d'un gisement. — *Total Information*, **88**, 6-9.

BARANYI, I., LIPPOLT, H.J. & TODT, W. (1976). — Kalium-Argon-Altersbestimmungen an tertiären Vulkaniten des Oberrheingraben-Gebietes : II. Die Alterstraverse vom Hegau nach Lothringen. — *Oberrh. geol. Abh.*, **25**, 41-62.

BERGERAT, F. (1977). — Le rôle des décrochements dans les liaisons tectoniques entre le fossé de la Saône et le fossé Rhénan. — *C. R. Soc. géol. France*, **1977**, 4, 195-199.

BLUMENROEDER, J. (1954). — Réunion extraordinaire de l'Association française des techniciens du Pétrole, Groupe Sud-Ouest, Section Géologie-Exploration. — *Bull. Assoc. franç. Techn. Pétrole*, **107**, 409-439.

BLUMENROEDER, J. (1962). — Le pétrole en Alsace. — *Abh. geol. Landesamt Bad.-Württemb.*, **4**, 41-62. (Erdöl am Oberrhein, ein Heidelberger Kolloqium).

BRUDERER, W. (1956). — Les Océans souterrains fossiles et le Pétrole. — *Bull. Assoc. franç. Techn. Pétrole*, **120**, 535-556.

BRUDERER, W. & LOUIS, M.C. (1958). — Conditions governing the distribution and origin of oil in the Rhine Graben of France and Germany. — *In* : WEEKS (ed.) : Habitat of oil. — *Amer. Assoc. Petroleum Geol.*, 1123-1133.

CHAMBRIER, P. de (1919). — Historique de Pechelbronn, 1498-1918. — Attinger, Paris; 330 p.

COMBAZ, A. (1983). — La recherche et la production des hydrocarbures sur le territoire français. — *Total Information*, **94**, 17-22.

CONNAN, J. & RESTLÉ, A. (1984). — La biodégradation des hydrocarbures dans les réservoirs. — *Bull. Centres Rech. Explor.- Prod. Elf-Aquitaine*, **8**, 2, 291-302.

COSTE, M. (1959). — Le champ de Scheibenhard. — *Bull. Assoc. franç. Techn. Pétrole*, **135**, 534-559.

DAUBRÉE, A. (1893). — Couches à pétrole des environs de Pechelbronn (Basse-Alsace); températures exceptionnellement élevées qui s'y manifestent. — *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, **117**, 265-269.

DOEBL, F. & GEISSERT, F. (1971). — Chattien supérieur et « Aquitanien » dans le nord de l'Alsace. — *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **24**, 2-3, 107-117.

EDEL, J.-B. (1978). — Contribution du magnétisme et de la gravimétrie à la connaissance du socle varisque dans l'Est de la France et le Sud de l'Allemagne. — *Sci. géol., Bull.*, **31**, 2, 45-55.

HAAS, J.O. & HOFFMANN, C.R. (1928). — Le gisement de calcaire asphaltique de Lobsann et son origine. — *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 1, 3, 277-301.

HERVE, J.C. & CAILLEUX, A. (1962). — Étude quantitative des failles de Pechelbronn (Bas-Rhin). — *Cah. géol.*, **68-69**, 733-741.

ILLIES, J.H. (1972). — The Rhinegraben rift system. Plate tectonics and transform faulting. — *Geophys. Surveys*, 1, 27-60.

ILLIES, J.H. & GREINER, G. (1979). — Holocene movements and state of stress in the Rhinegraben rift system. — *Tectonophysics*, **52**, 349-359.

LE BEL, J.A. (1885). — Notice sur les gisements de pétrole à Pechelbronn. — *Bull. Soc. Hist. nat. Colmar*, **24-26**, 445-459.

LOUIS, M. & BIENNER, F. (1953). — Étude géochimique des pétroles du Fossé Rhénan. — *Rev. Inst. franç. Pétrole*, **8**, 6, 239-247.

MAIKOVSKY, V. (1952). — Le pétrole dans le Haut-Rhin : le sondage Staffelfelden IV — DP 25. — *Bull. Soc. industr. Mulhouse*, **1**, 25-34.

PERRODON, A. (1983). — Rifts et ressources énergétiques fossiles. — *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, **7**, 129-135.

ROLL, A. (1979). — Versuch einer Volumenbilanz des Oberrheintalgrabens und seiner Schultern.— *Geol. Jb.*, A, **52**, 3-82.

RUHLAND, M. (1967). — Position tectonique du horst de Mulhouse dans le fossé rhénan méridional. — *Abh. geol. Landesamt Bad.-Württemb.*, **6**, 31-32 et *Publ. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*

SCHNAEBELE, R. (1948). — Monographie géologique du champ pétrolifère de Pechelbronn . — *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **7**, 254 p.

SITTER, L.U. (DE) (1939). — Origin of oil in the Lower Oligocene of the Upper Rhine Valley, Pechelbronn field. — *Geol. en Mijnb.* (1), **9**, 221-230.

SITTLER, C. (1965). — Le Paléogène des fossés rhénan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques. — *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **24**, 392 p.

SITTLER, C. (1967). — Le soubassement et le remplissage sédimentaire du fossé rhénan, au niveau du bassin de Pechelbronn et du seuil d'Erstein. Coupes géologiques à travers le fossé rhénan. — *Abh. geol. Landesamt Bad.-Württemb.*, **6**, 69-80 et *Publ. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*

SITTLER, C. (1972). — Le pétrole dans le département du Haut-Rhin. Bilan d'un siècle et demi de recherches et d'exploitations. — *Sci. géol., Bull.*, **25**, 2-3, 151-161.

SITTLER, C. (1974 *a*). — Le Fossé Rhénan ou la plaine d'Alsace. — *In* : DEBELMAS, J. (éd.) : Géologie de la France, 78-104. — Doin, Paris.

SITTLER, C. (1974 *b*). — Sous-sol et ressources pétrolières en Basse Alsace. Aspect géologique et bilan de deux siècles et demi de recherches et d'exploitations. — *Saisons d'Alsace*, **52**, 31-62.

SITTLER, C. (1982). — Asphalte : produit organique naturel, mines de Lobsann, situation géologique, origine de l'asphalte de Lobsann, production des mines. — *In* : Encyclopédie de l'Alsace, **1**, 369-372. — Publitotal, Strasbourg.

SITTLER, C. (1983). — Fossé rhénan : région naturelle et cadre structural, le bloc rhénan aux ères primaire et secondaire, histoire et évolution du fossé au Tertiaire, processus tectoniques, volcanisme, structure profonde et origine du fossé rhénan. — *In* : Encyclopédie de l'Alsace, **5**, 3122-3137. — Publitotal, Strasbourg.

SITTLER, C. & WESTPHAL C. (1974). — La recherche du pétrole mène au thermalisme à Pechelbronn. — *Saisons d'Alsace*, **52**, 130-140.

STRAUB, W.E. (1962). — Die Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Hessen und Rheinhessen. — *Abh. geol. Landesamt Bad.-Württemb.*, **4**, 123-136.

TEICHMÜLLER, M. (1970). — Bestimmung des Inkohlungsgrades von kohligen Einschlüssen in Sedimenten des Oberrheingrabens — ein Hilfsmittel bei der Klärung geothermischer Fragen. — *In* : ILLIES, J.H. & MUELLER, S. (eds) : Graben Problems, 124-142, Schweizerbart, Stuttgart (Intern. Upper Mantle Proj., Sci. Report, 27).

THÉOBALD, N. (1967). — Les sondages profonds de la partie méridionale du Fossé rhénan. Renseignements généraux sur l'évolution du Fossé rhénan. — *Ann. sci. Univ. Besançon*, (3), Géol. **3**, 3-24.

VOGT, H. (1980). — Étude géomorphologique du rebord sud-occidental du fossé rhénan. — Thèse Dr. ès Sciences, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg; 437 p.

VONDERSCHMITT, L. (1942). — Die geologischen Ergebnisse der Bohrungen von Hirtzbach bei Altkirch (Ober-Elsass). — *Eclogae geol. Helv.*, **35**, 67-99.

WERVEKE, L. van (1895). — Vorkommen, Gewinnung und Entstehung des Erdöls im Unter-Elsass. — *Mitt. Philom. Ges. Els.-Lothr.*, **1**, 3, 17-40.

ZIEGLER, P.A. (1982). — Faulting and graben formation in western and central Europe. — *Phil. Trans. r. Soc. London*, **A 305**, 113-143.